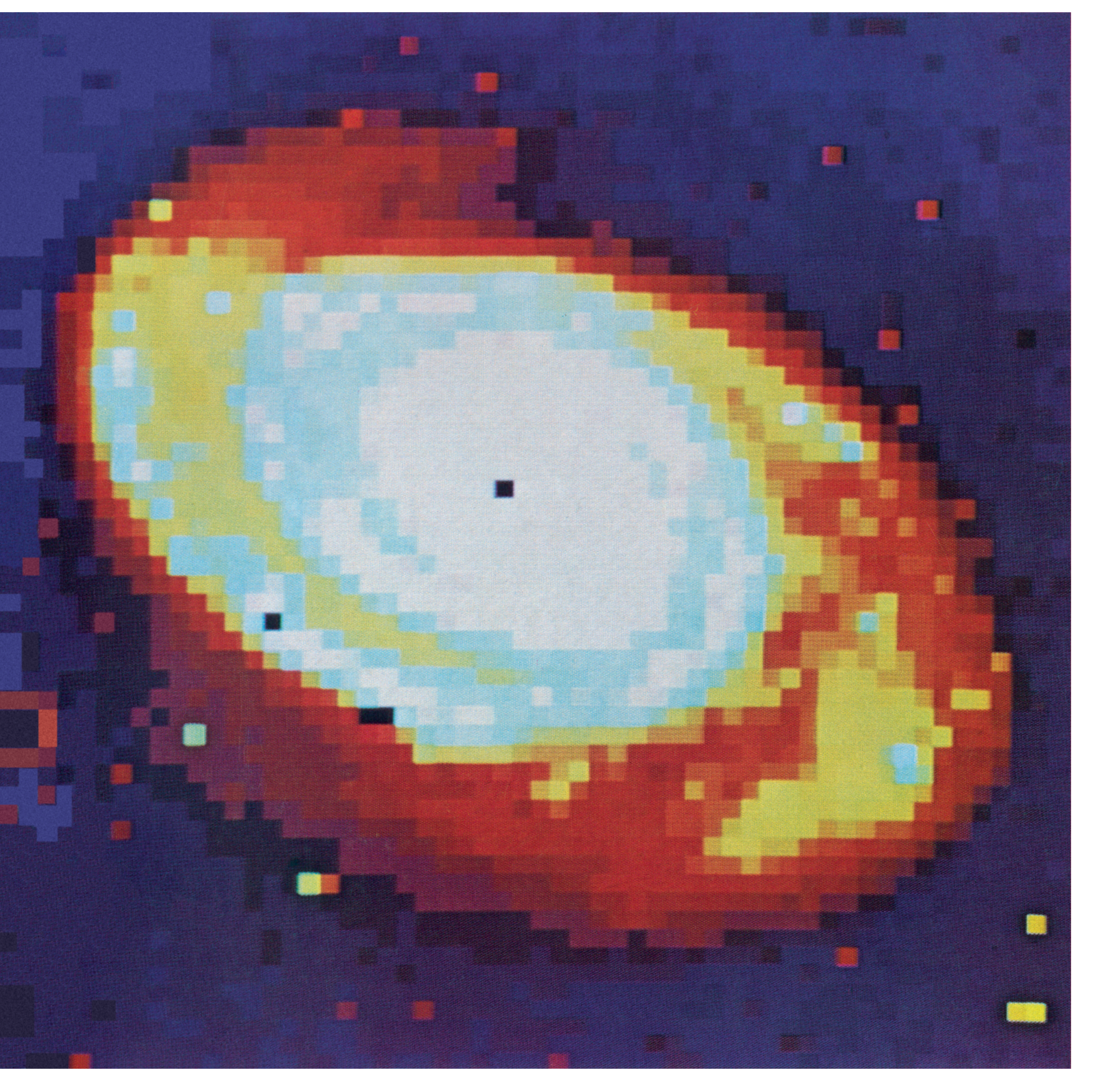
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



EVOLUCION DE LAS GALAXIAS

Junio 1979

200 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 33
Junio 1979

INVESTIGACION Y CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

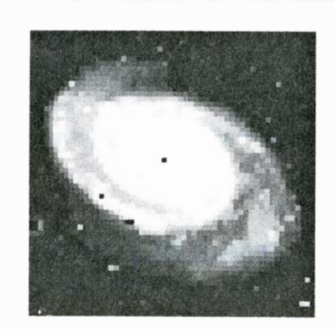
Josep Rucabado: *Armas que utilizan haces de partículas*; Eduardo Cadenas: *Un enzima de la glándula pineal que controla el tiempo*; Manuel Puigcerver: *Evolución de las galaxias de disco*; Miquel Gich: *La arcilla*; Ramón Fontarnau y Frances E. Lynd: *Teratomas y quimeras*; José L. Melena: *La osteomancia china*; José Mª Vidal: *La física del karate*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Manuel García Doncel

Libros:

José Sandoval, Ramón Margalef, Carlos Gómez-Reino y Patricia Castillo



LA PORTADA

La ilustración de la portada representa una galaxia espiral típica, NGC 5364, no muy diferente de nuestra propia Vía Láctea. NGC 5364 se encuentra a unos 75 millones de años-luz en la constelación de Virgo. Las galaxias espirales son un tipo de galaxias de disco en las que la configuración espiral en el disco está reforzada por la presencia en los brazos espirales de estrellas jóvenes y calientes y los complejos de hidrógeno ionizado asociados a ellas. Las galaxias de disco que nacen como miembros de cúmulos de galaxias ricos y densos están con frecuencia desprovistas del gas en su disco y la configuración espiral aparece sólo débilmente [véase "Evolución de las galaxias de disco", por Stephen E. Strom y Karen M. Strom, en este mismo número]. Esta ilustración se realizó con el sistema interactivo de procesado de imágenes (IPPS) desarrollado en el Observatorio Nacional de Kitt Peak. Mediante este sistema, la distribución del brillo óptico en la fotografía original en blanco y negro, tomada con el telescopio Mayall de cuatro metros de Kitt Peak, se ha digitalizado y convertido en un conjunto de colores arbitrarios.

Suscripciones:
Prensa Científica, S.A.
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2200 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 36 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
225 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
340 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49; Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239; Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovín
Avda. de Moratalaz, 137; Madrid-30
Tel. 439 41 50 ext. 468
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 3.ª; Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración de la portada por cortesía del Kitt Peak National Observatory

Página	Fuente
7-8	George V. Kelvin
9	Ilil Arbel
10-17	George V. Kelvin
21-25	Bunji Tagawa
29	Kitt Peak National Observatory
30	Kitt Peak National Observatory (*arriba, medio izquierda y centro; abajo, centro derecha*), Hale Observatories (*medio derecha y abajo izquierda*)
14	
31-35	Kitt Peak National Observatory
36	Ilil Arbel
37	Kitt Peak National Observatory
38	Ilil Arbel
46	W. D. Keller
48	Necip Güven (*arriba*), Wayne F. Hower (*abajo*)
49	Wayne F. Hower
48-54	Walken Graphics
58	Leroy C. Stevens
59	Pat Wynne
60	Leroy C. Stevens
61	Pat Wynne (*arriba*), Leroy C. Stevens (*abajo*)
62	Pat Wynne
63	Karl Illmensee
64-67	Pat Wynne
68-70	Karl Illmensee
72	Ralph Morse
74-76	Tom Prentiss
77	Hung-hsiang Chou
78	Tom Prentiss
79	Hung-hsiang Chou (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
80	Tom Prentiss
83	Charles Miller
84	Michael S. Feld, Ronald E. McNair y Stephen R. Wilk (*arriba*), Adolph E. Brotman (*abajo*)
85	Adolph E. Brotman
86	Charles Miller
87	Adolph E. Brotman
88	Charles Miller
89	Adolph E. Brotman
93-96	Joaquín Barraquer
98-102	Ilil Arbel
105-109	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda
Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JOHN PARMENTOLA y KOSTA TSIPIS ("Armas que utilizan haces de partículas") son físicos que trabajan en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Parmentola es investigador adjunto de física nuclear en el Centro de Física Teórica del MIT y miembro de la comisión de Asuntos Públicos de la American Physical Society. Se graduó en el Instituto Politécnico de Brooklyn y en 1977 se doctoró en física en el MIT. Tsipis, físico nuclear por formación, dedica todo su tiempo a temas de política de defensa y de aspectos técnicos de control de armamento. Nacido en Grecia, llegó a la Rutgers University norteamericana en 1954, con una beca Fulbright. En 1966 se doctoró en física de partículas de alta energía por Columbia. En 1977 fue designado investigador del Instituto Internacional de Investigación para la Paz (SIPRI), de Estocolmo. El año pasado recibió el nombramiento de director adjunto del Programa de Ciencia y Tecnología para la Seguridad Internacional dentro del departamento de física del MIT.

SUE BINKLEY ("Un enzima de la glándula pineal que controla el tiempo") enseña biología en Temple University. Se graduó en la Universidad de Colorado en Boulder y a continuación realizó investigación como posgraduada en Rice University. Completó sus estudios de doctorado en la Universidad de Texas en Austin, con una tesis sobre función de la glándula pineal en los ritmos diarios de los gorriones. La fisiología de la glándula pineal sigue siendo el centro de su investigación en Temple.

STEPHEN E. STROM y KAREN M. STROM ("Evolución de las galaxias de disco") forman un equipo de astrónomos compuesto de marido y mujer. Stephen Strom es astrónomo titular en el Observatorio Nacional de Kitt Peak y director del Programa Galáctico y Extragaláctico de Kitt Peak. Estudió astronomía en la Universidad de Harvard, obteniendo su doctorado en 1964. Hasta hace poco, sus intereses de investigación se han centrado en la atmósfera, composición y evolución de las estrellas, pero en los últimos años se ha dedicado a investigar el efecto del medio intergaláctico sobre la estructura y evolución de las galaxias. Karen Strom ha estado colaborando científicamente con su esposo desde que se conocieron en 1958. Recibió su título de Bachelor en Astronomía en el Radcliffe College en 1964. Desde 1972 ha sido investigador asociado en Kitt Peak.

GEORGES MILLOT ("La arcilla") enseña geología en la Universidad Louis Pasteur de Strasbourg y dirige el Centro de Sedimentología y Geoquímica superficial del Centre National de la Recherche Scientifique de Francia (CNRS). Estudió en la Escuela Normal Superior de París donde obtuvo su "agrégation" en ciencias naturales en 1942 y su doctorado en 1950. De 1942 a 1954 fue profesor de la Escuela Nacional Superior de geología aplicada y de prospecciones mineras y en la Universidad de Nancy. Luego se trasladó a Strasbourg, en donde se le nombró decano de la facultad de ciencias. Además de prestar sus servicios como consejero para las ciencias de la tierra del Ministerio de Universidades francés, presidió la sociedad Geológica Nacional. En 1977 Millot fue elegido miembro de la Academia Nacional de Ciencias.

KARL ILLMENSEE y LEROY C. STEVENS ("Teratomas y quimeras") han colaborado en la investigación básica del cáncer. Illmensee es profesor de biología en la Universidad de Ginebra. Se doctoró en la Universidad de Munich en 1971. Tras dos años en la facultad de zoología, se trasladó a los Estados Unidos para trabajar con Beatrice Mintz en el Institute for Cancer Research en Filadelfia sobre teratomas de ratón (tumores de las células germinales). A continuación pasó unos meses en el Jackson Laboratory en Bar Harbor, donde se encontró con Stevens. Stevens es científico senior en el Jackson Laboratory. Obtuvo su grado de licenciatura en la Universidad de Cornell y su doctorado en 1952 en la de Rochester. En el Jackson Laboratory descubrió en 1953 la tendencia de la cepa 129 de ratones a desarrollar teratomas testiculares.

HUNG-HSIANG CHOU ("La osteomancia china") es profesor asociado de lenguas orientales en la Universidad de California en Los Angeles. Nacido en 1935 en Chaochou, provincia de Kwangtung, China, estudió en la Universidad de Hong Kong, donde estudió literatura clásica china e historia. Obtuvo después su doctorado en arqueología, paleografía e historia china en la Universidad Nacional Australiana de Camberra. Tras enseñar dos años en Hong Kong, se trasladó a los Estados Unidos en 1969 y entró en la facultad de la Universidad de California en Los Angeles, donde ha abierto nuevas vías en la aplicación de la cibernética a los estudios osteománticos.

MICHAEL S. FELD, RONALD E. McNAIR y STEPHEN R. WILK ("La física del karate") son físicos con un interés extravocacional en las artes marciales. Feld enseña en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), en donde se graduó, licenció y doctoró. En julio de 1976 pasó a dirigir el Laboratorio de Espectroscopía del MIT. Su campo de especialización reside en la física del láser y, en particular, en la interacción de intensos haces de luz con sistemas atómicos y moleculares. Feld posee el cinturón marrón de tercer grado en karate. McNair es un aspirante a astronauta en el Centro espacial Lyndon B. Johnson de Houston, Texas. Se graduó en física en la Universidad estatal de Carolina del Norte y se doctoró en el MIT en 1976 por su trabajo sobre los láser de monóxido de carbono de alta presión. Después pasó a ser físico estable de los Laboratorios de Investigación Hughes de Malibu, California, antes de entrar en la NASA, en donde se encuentra entregado a un programa de dos años de entrenamiento y evaluación para incorporarse a futuros vuelos espaciales tripulados. McNair posee el cinturón negro de segundo grado en karate. Wilk estudia en el Instituto de Optica de la Universidad de Rochester. Se graduó en el MIT en 1977 e hizo su tesina sobre la física del karate.

JOAQUIN BARRAQUER ("Evolución de los trasplantes de córnea") es catedrático numerario de cirugía ocular de la Universidad Autónoma de Barcelona y director de la Escuela Profesional de Especialización Oftalmológica del Instituto Barraquer (adscrito a la Universidad A. de Barcelona). Ha ideado numerosas técnicas e instrumentos quirúrgicos de su especialidad y ha publicado, entre otros, un extenso tratado de *Cirugía del segmento anterior del ojo*. Continuador de la obra de su padre, el doctor Ignacio Barraquer, que fue el fundador del instituto de su nombre, posee numerosas condecoraciones académicas nacionales y extranjeras.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Luis Mercado publicó *De mulierum affectionibus,* el tratado de tocoginecología más difundido en la Europa de la época, con nueve ediciones en menos de cincuenta años. Mercado se formó en la Universidad de Valladolid y ocupó luego, durante veinte años (1572-1592), su principal cátedra de medicina. Fue médico de cámara de Felipe II y de Felipe III. Por su labor científica, es generalmente considerado como la máxima figura europea del escolasticismo médico contrarreformista. Disponía de una información relativamente buena acerca de las novedades científicas, pero se esforzó en refutarlas siempre que comprometieran el sistema galénico. Aspiró fundamentalmente a ofrecer una reestructuración del saber tradicional, para lo cual proyectó desde muy joven una ambiciosa exposición sistemática del mismo.

En anatomía, Mercado incorporó algunos avances recientes, como la descripción de las vías biliares debida a Gabrielle Falloppio, pero se opuso a las innovaciones que pusieran en peligro las doctrinas fisiológicas tradicionales. Negó, por ejemplo, la circulación pulmonar descubierta por Miguel Serveto y difundida en toda Europa por Juan Valverde de Amusco. Parecida actitud mantuvo ante las novedades relativas a temas patológicos. Se opuso, por ello, a la teoría de la fiebre del medinense Gómez Pereira, que afirmaba que el calor febril no se distingue del natural más que por su cantidad. Aceptó, en cambio, la hipótesis del italiano Girolamo Fracastoro, de que el contagio se debía a unas minúsculas e invisibles "semillas" o *seminaria.*

Por otra parte, Mercado fue un excelente observador clínico, al que se deben la primera descripción moderna del "garrotillo" o angina diftérica sofocante y uno de los más tempranos estudios sobre el "tabardillo" o tifus exantemático. Un aspecto de su labor que merece ser destacado son sus monografías sobre materias que siglos más tarde alcanzarían autonomía como especialidades médicas. Con posterioridad a *De mulierum affectionibus,* publicó uno de los títulos iniciales de la literatura sobre genética médica (1605) y un tratado de pediatría y puericultura (1611).

... trescientos años

Jacobo Kresa fue nombrado titular de la cátedra de matemáticas del Colegio Imperial de Madrid, tras la muerte del astrónomo José de Zaragoza. Kresa era un jesuita nacido en Austria que permaneció en la corte madrileña hasta el fallecimiento de Carlos II. La cátedra que ocupó había sido uno de los principales centros de la introducción en España de los nuevos saberes matemáticos y astronómicos, especialmente durante la década que la ocupó Zaragoza. Kresa continuó esa línea y, como ha hecho notar Víctor Navarro, durante su permanencia en Madrid prologó o escribió la aprobación de la mayor parte de los libros de matemáticas que se publicaron entonces en España. Su aportación personal de mayor importancia fue una edición castellana de los *Elementos* de Euclides (1689). A finales del siglo XVI y comienzos del XVII, se había traducido parte de la obra de este autor clásico en la Academia de Matemáticas de Madrid, sobre todo por Juan Cedillo Díaz, Pedro Ambrosio De Ondériz y Luis Carduchi. Un año antes que Kresa, el ingeniero militar Sebastián Fernández de Medrano había publicado también otra edición en nuestro idioma que incluía, como la del profesor del Colegio Imperial, los seis primeros libros, el onceavo y el doceavo. Kresa añadió "algunos selectos Theoremas de Archímedes", materiales propios y otros procedentes de autores españoles de la época. Entre ellos figuran dos problemas, con sus soluciones, del gaditano Hugo de Omerique, sin duda la máxima figura de la matemática española del siglo XVII.

... doscientos años

José Antonio de Alzate y Ramírez trabajó, como comisionado del virrey de Nueva España, en la búsqueda de azogue en México. La empresa, que acabó sin conseguir resultados satisfactorios, estaba relacionada con la explotación de las minas de plata locales y fue una de las numerosas tareas de tipo científico y técnico que realizó Alzate a lo largo de su vida. Estudió en el Colegio de San Ildefonso de México hasta terminar el bachillerato y siguió después la carrera eclesiástica. Aunque como científico fue un autodidacta, llegó a alcanzar un notable prestigio, siendo miembro correspondiente de la Académie des Sciences de París y del Jardín Botánico de Madrid. Realizó una intensa labor de divulgación científica en varios periódicos y revistas fundados por él, comenzando por el *Diario Literario de México* (1768), siendo también colaborador científico regular de la *Gaceta de México.* Cultivó la cartografía, trazando mapas de América del Norte y del valle de México, un atlas de su arzobispado y un plano de la ciudad, que alcanzaron amplia difusión en Europa. Realizó también observaciones astronómicas y numerosos trabajos botánicos, entre los que destaca el dedicado a la cochinilla.

... cien años

Leopoldo López García marchó a París, donde se formó bajo la dirección del histólogo Louis Antoine Ranvier, del que llegó a ser uno de sus discípulos más apreciados. Había estudiado medicina en la Facultad de Madrid y, bajo la influencia del magisterio de Aureliano Maestre de San Juan, había decidido consagrarse a la histología.

Tras su estancia en la capital francesa, López García trabajó como ayudante de Maestre hasta que, en 1888, obtuvo la cátedra de histología de la Facultad de Medicina de Valladolid, de la que fue titular hasta su jubilación. A partir de 1881, publicó trabajos sobre histología normal y patológica. Colaboró en el estudio histopatológico de casos de diferentes figuras de la cirugía y de la medicina interna de la época, entre ellas Juan Manuel Mariani, y se ocupó con especial atención de los queratomas. También realizó estudios microbiológicos, siendo autor de una temprana monografía sobre el bacilo de Koch y la técnica del examen microscópico de los esputos para el diagnóstico de la tuberculosis (1884). En 1905, aparecieron sus *Lecciones de técnica histológica.* No obstante, el aspecto más destacado de su labor fue la docencia. Enseñó las primeras preparaciones microscópicas a Ramón y Cajal, cuando éste asistió al curso de doctorado de Maestre de San Juan.

... cincuenta años

Apareció la segunda edición de *Los horizontes de la psicoanálisis* de César Juarros Ortega, título de relieve en la literatura española de entreguerras consagrada a la doctrina de Freud. El mismo año, su autor ingresó en la Academia de Medicina de Madrid con un discurso titulado *Estética profesional.*

Juarros había estudiado medicina en la Facultad de Madrid, donde tuvo

LVDOVICI MERCATI
MEDICINÆ DOCTORIS, ET IN VALLE
ſoletana Academia primariæ Cathedræ
profeſſoris.

De Mulierum affectionibus.
Libri Quatuor.

Quorum primus de communibus Mulierum paſsionibus differit. Secundus Virginum & Viduarum morbos tractat. Tertius, ſterilium & prægnantium. Quartus, puerperarum, & nutricum accidentia, ad vnguem exequitur.

Summam quorum ſequens pagina indicabit.



Con Priuilegio.
Valleſoleti excudebat Didacus Fernandez à Corduba
Typographus Regius.
Anno 1579.

Portada de la primera edición, impresa en Valladolid, del tratado tocoginecológico de Luis Mercado, el de mayor difusión y prestigio en la Europa de la época

como principal maestro al internista Manuel Alonso Sañudo. Se consagró profesionalmente a la neuropsiquiatría, sobresaliendo especialmente en el campo de la psiquiatría forense y en el estudio de los subnormales. Impartió una notable actividad docente como profesor de psiquiatría del Instituto Español de Criminología, en parte reflejada en sus *Lecciones de psiquiatría forense* (1915). Fue, por otra parte, médico director de la Escuela Central de Anormales y publicó sobre este tema numerosos trabajos, en su mayoría desde una perspectiva médicosocial. Destaca, quizás, el titulado *El problema social y familiar de los niños mentalmente anormales* (1931). Concedió gran importancia a la difusión de los saberes psiquiátricos entre los profesionales de la medicina, con artículos y libros como *La psiquiatría del médico general* (1919), así como a la divulgación sanitaria. Encabezó un auténtico movimiento de reforma sexual, defendiendo en especial la necesidad de institucionalizar la educación sexual de los niños. Presidió la Sociedad Española de Abolicionismo.

Armas que utilizan haces de partículas

Se afirma que los misiles pueden ser abatidos mediante el uso de aceleradores de partículas. Aun en el caso de que pudiera construirse un arma de tal tipo, no resultaría eficaz a causa de su propia vulnerabilidad a las contramedidas

John Parmentola y Kosta Tsipis

Desde hace décadas, los físicos conocedores del diseño y funcionamiento de los aceleradores de partículas elementales saben que un haz intenso de partículas cargadas o neutras puede transportar una cantidad de energía potencialmente destructiva, capaz bajo determinadas circunstancias de, por ejemplo, originar por fusión un hueco en una pieza de metal, o de averiar circuitos electrónicos protegidos. Sin embargo, hasta hace poco no se había tomado seriamente en consideración, en algunos círculos, la idea de utilizar haces de partículas como base para un nuevo tipo de armamento. Se sabe que los Estados Unidos están financiando investigaciones en varios proyectos de armas que utilizan haces de partículas, y es probable que la Unión Soviética esté haciendo más o menos lo mismo.

En el supuesto de que llegasen a desarrollarse tales armas, ¿cómo operarían? ¿Cuál sería su utilización? ¿Cuáles los principales obstáculos técnicos y operativos que habría que vencer para que este tipo de armas fuera eficaz? Intentaremos responder a todas las preguntas basándonos esencialmente en los resultados de un estudio de factibilidad llevado a cabo recientemente bajo el patrocinio del Programa de Ciencia y Tecnología para la Seguridad Internacional dentro del departamento de física del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). El grupo de estudio estaba formado por varios miembros del claustro de profesores de física del MIT, entre los que se encontraban los autores y algunos científicos externos con experiencia en el campo de la física de radiaciones de partículas.

Las armas de haces de partículas diferirán sustancialmente de todos los ingenios de guerra anteriores. En vez de llevar a un objetivo energía destructiva en forma de un contenido explosivo transportado en el interior de un vehículo pesado, como pudiera ser un proyectil o un obús de artillería, las nuevas armas deberán aumentar la energía cinética de gran cantidad de partículas atómicas y subatómicas individuales y dirigirlas luego conjuntamente contra un objetivo. Cada partícula que choque contra el objetivo le transferirá a éste parte de su energía. Si el número de partículas que alcance el objetivo fuera suficientemente grande en un período de tiempo corto, la energía depositada podría en teoría fundir un hueco en la "piel" de un proyectil u obús ofensivo, y disparar el detonante de explosión química de una cabeza nuclear, o descomponer la parte electrónica del vehículo.

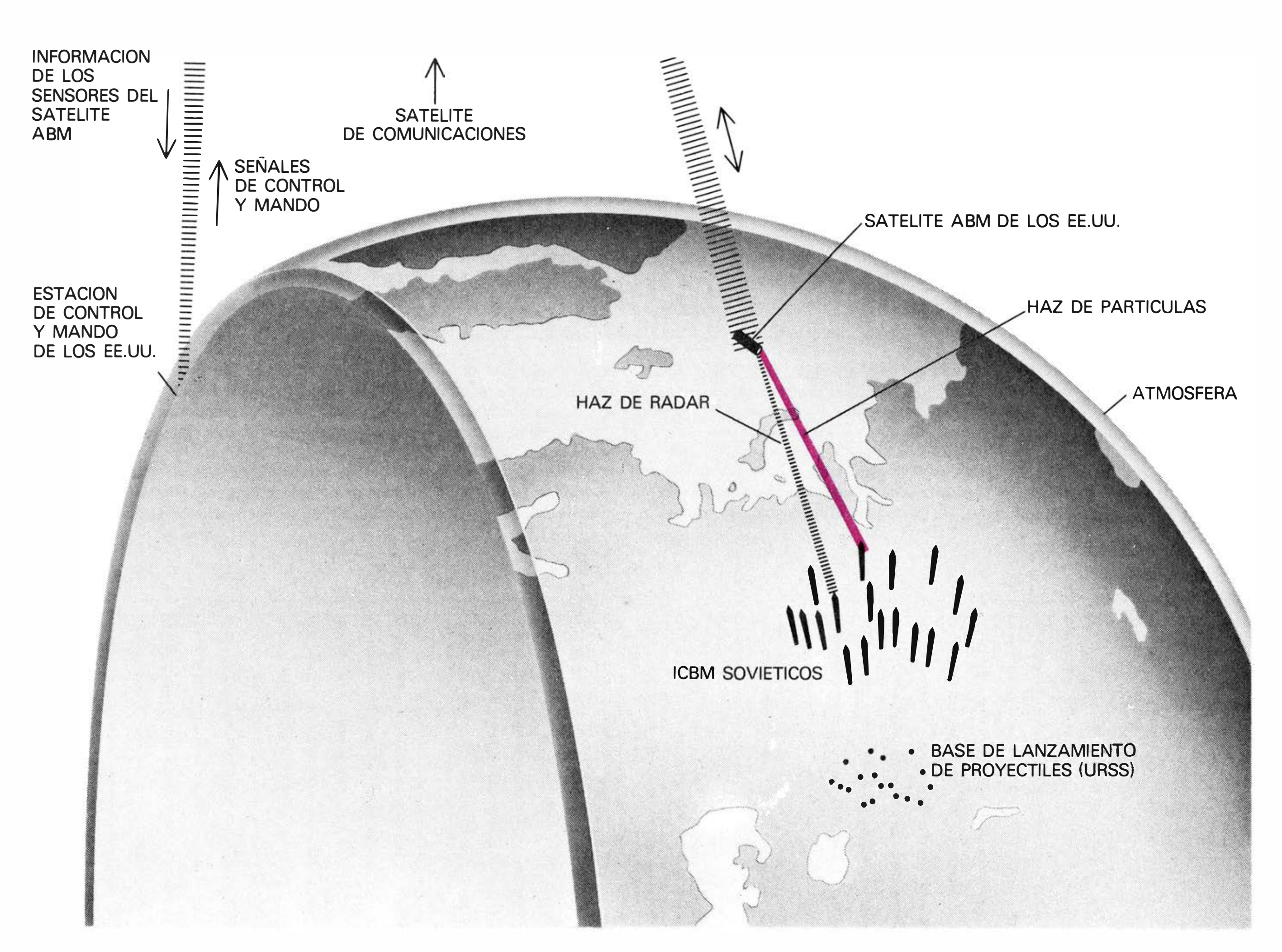
¿Cómo puede producirse un haz de partículas intenso, de alta energía? Toda partícula cargada sometida a una caída de potencial eléctrico, o voltaje, recibe un impulso que incrementa su energía cinética en una cantidad igual a la caída de potencial. Así, un electrón o un protón sometido a una caída de potencial de un millón de volt adquiere una energía cinética adicional de $1{,}6 \times 10^{13}$ joule, cantidad equivalente a un millón de electronvolt (MeV). Este procedimiento no puede acelerar partículas neutras debido a que, por definición, no poseen carga eléctrica. (No obstante, pueden obtenerse haces de partículas neutras de alta energía, acelerando primeramente un haz de partículas con carga y convirtiéndolas luego en partículas neutras.) Todo dispositivo electromagnético destinado a aumentar la energía cinética de un haz de partículas cargadas sometiéndolas a una secuencia de impulsos como los descritos se considera un acelerador. Un simple acelerador lineal apropiado para uso bélico estaría formado por tres partes fundamentales: una fuente de partículas, un dispositivo de inyección de partículas en el acelerador y una serie de secciones de aceleración.

Existen diversos métodos para producir, gran cantidad de electrones e iones (átomos con carga eléctrica). Hay también todo un abanico de inyectores de electrones e iones que podrían en principio suministrar una ráfaga intensa y compacta de partículas a la entrada de la sección de aceleración de un arma de haces de partículas. Y además, a lo largo de los años los físicos han inventado varias maneras de acelerar partículas cargadas con trayectoria rectilínea. Si se necesita un haz de muy alta energía, pero de una intensidad relativamente baja, la técnica preferida consiste en generar primero una onda electromagnética que se desplace de tal modo que empuje ante sí un frente de partículas, al igual que las olas del océano empujan a una tabla "surf". Este es el principio operativo de muchos aceleradores que se usan actualmente para investigación en física de partículas elementales, por ejemplo el acelerador de dos millas del Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). Si se requiere una muy alta intensidad y una relativamente baja energía (como sería el caso de este sistema de armamento), el método preferido consistiría en exponer un haz de partículas a una serie de impulsos suministrados por un campo eléctrico inducido por una variación rápida de un campo magnético en un anillo toroidal de material magnético durante el paso de partículas a través del hueco central. Un ejemplo de acelerador de inducción de este tipo es la máquina Astron del Lawrence Livermore Laboratory, dispositivo diseñado para realizar investigaciones sobre fusión. Todos los aceleradores lineales en funcionamiento pueden ser clasificados en una de estas dos categorías.

Se han alcanzado energías (en haces de protones) de alrededor de 500 mil millones de electronvolt (GeV) en el acelerador circular gigante del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), que ha estado funcionando durante varios años. Este tipo de aceleradores suele disponer de un flujo relativamente reducido de partículas (del orden de 10^{14} por segundo), comparado con lo que necesitaría un arma de haces de partículas. La potencia de un haz salido del acelerador es igual al producto de la caída de potencial total a la que están sometidas las partículas (mientras permanecen en el interior de la máquina) por la intensidad del haz. (Una intensidad de un ampère es igual al flujo de alrededor de 6×10^{18} partículas de una carga eléctrica por segundo.) Por tanto, un acelerador que proporcione una energía cinética de 1 GeV a cada partícula y que produzca un haz de una intensidad de un ampère tendría una potencia de un gigawatt (mil millones de watt). La energía total de un haz emitido por un acelerador es igual a la potencia del haz multiplicado por la duración de la ráfaga. Así pues, una ráfaga de un gigawatt que dure una millonésima de segundo lleva exactamente 1000 joule de energía.

¿Qué sucede cuando las partículas de este haz alcanzan un objetivo? Una gran parte de ellas penetran en su interior y recorren cierto trecho. Al hacerlo, cada partícula va perdiendo energía principalmente por transferencia a electrones del objetivo mediante una serie de choques elásticos que cambian relativamente poco la dirección de su movimiento. Con el tiempo, la energía perdida en el material llega a manifestarse en forma de calor, elevando la temperatura de la parte del objetivo alcanzada por el haz. Si la cantidad de partículas que depositan energía en una zona del objetivo es suficientemente grande (la velocidad de entrada de nueva energía debe ser superior a la velocidad de radiación o de conducción de calor permitida por el material), la temperatura puede elevarse hasta que la parte impactada por el haz se funda o se quiebre a causa de las tensiones térmicas. La cantidad de energía que deposita cada partícula en el objetivo depende de la masa y energía de la partícula, del tipo de material del objetivo y de la distancia total recorrida por la partícula en el interior del objeto diana.

Obviamente, las armas de haces de partículas utilizarán nuevas propiedades y principios de funcionamiento. En primer lugar, deberán depositar energía destructiva en una zona de la superficie



UNA DE LAS APLICACIONES propuestas para las armas de haces de partículas consiste en el despliegue de un nuevo sistema de defensa contra los proyectiles balísticos (ABM, del inglés "anti-ballistic-missile") instalado en satélites artificiales dispuestos a abatir los proyectiles ofensivos del enemigo tan pronto como salgan de la atmósfera. Suponiendo que la altura de las órbitas de los satélites fuera de 1000 kilómetros, sería necesario posicionar cuidadosamente 150 de ellos para asegurar que todo posible punto de lanzamiento de proyectiles accesible al enemigo fuera en todo momento cubierto, por lo menos, por un arma de haces de partículas. En el caso de un ataque masivo y realizado por sorpresa por parte soviética contra los Estados Unidos, representado aquí esquemáticamente, la única arma de haces de partículas situada en la posición adecuada de fuego en el momento del ataque debería presumiblemente detectar, identificar y destruir unos 1000 proyectiles balísticos intercontinentales (ICBM) rusos en unos 400 segundos. Además, el haz de partículas debería alcanzar un impacto directo en cada uno de los objetivos a fin de destruirlos. A una distancia de 1000 km, el sistema de puntería controlado por radar del satélite debería determinar la posición de un proyectil con una precisión de una parte sobre 100.000 cada 0,4 segundos. Las comunicaciones entre el satélite ABM y la estación terrestre de control y mando deberían canalizarse a través de un satélite situado en una órbita geosincrónica, o estacionaria respecto del suelo, a una altura cercana a los 40.000 km.

1000 KILOMETROS

a

SATELITE ABM DE LOS EE.UU.

MAGNETO DE DIRECCIONAMIENTO

ACELERADOR

FUENTE DE ENERGIA, ETC.

HAZ DE PARTICULAS CARGADAS

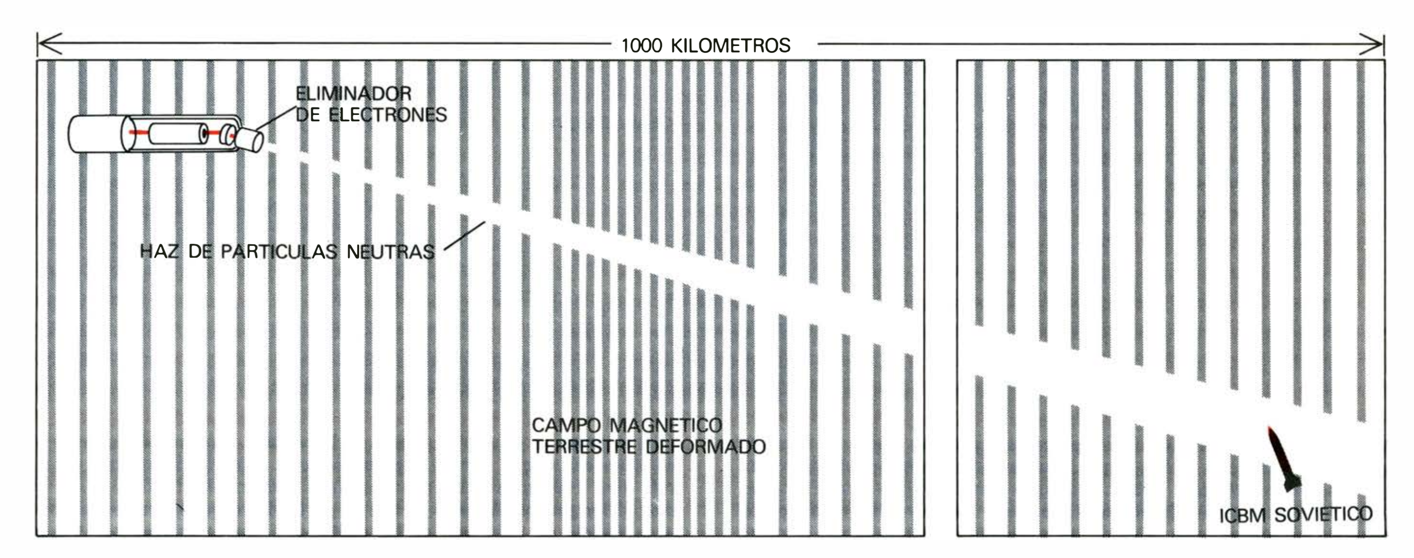
CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

ICBM SOVIETICO

b

CAMPO MAGNETICO TERRESTRE DEFORMADO

HAZ DE PARTICULAS CARGADAS que se propaga en el vacío del espacio exterior. Dicho haz se halla sometido a diversas limitaciones físicas, dos de las cuales se representan aquí. En el supuesto de que el haz de partículas cargadas se propagara a una distancia apreciable del punto de salida del acelerador (hipótesis discutible si se considera la fuerza de atracción ejercida por las cargas de signo contrario que salen por atrás), el haz resultante tendería a diverger y a dispersarse a causa de las fuerzas de repulsión que se ejercen mutuamente las partículas cargadas con el mismo signo en el propio haz. Verbigracia, un haz de electrones con una energía de mil millones de electronvolt (GeV) y de un diámetro inicial de un centímetro se extendería a un diámetro de cinco metros a la distancia de 1000 kilómetros (*a*). Aun cuando este haz, sumamente difuso, pudiera dañar de un modo eficaz un ICBM enemigo, no podría confiarse en la precisión de su puntería, puesto que sería desviado por fluctuaciones aleatorias del campo magnético terrestre (*b*). Las dos armas contrarias han sido dibujadas aproximadamente en la misma escala. El dibujo del satélite ABM es conceptual.



HAZ DE PARTICULAS NEUTRAS, que se propagaría en el espacio sin desviaciones debidas al campo magnético terrestre. Podría generarse un haz de átomos neutros de hidrógeno, por ejemplo, acelerando en primer lugar hidrogeniones negativos en el acelerador del satélite, y eliminando luego los electrones sobrantes haciendo pasar el haz a través de un gas enrarecido. Suponiendo que los magnetos que dirigen y concentran el haz original de átomos cargados pudieran ser protegidos de la influencia del campo magnético terrestre, un haz de hidrógeno neutro de este tipo, que midiera un centímetro de diámetro en el punto de salida del acelerador hipotético, se dispersaría hasta un diámetro de veinte metros al cabo de 1000 kilómetros.

del objetivo y no extenderla uniformemente en un volumen esférico que se expande desde el centro de una explosión. De donde se deduce que un haz de partículas no puede dañar un objetivo a no ser que le impacte realmente. En segundo lugar, la energía que las partículas transportan al objetivo es la misma que produce el daño (lo que no ocurre con las armas convencionales). En tercer lugar, mientras un proyectil convencional con energía destructiva almacenada en su cabeza se dirige a su objetivo, a una velocidad no mayor que unas pocas veces la del sonido (aproximadamente 1500 metros por segundo), la energía destructiva de un haz de partículas puede desplazarse prácticamente a la velocidad de la luz: 300 millones de metros por segundo.

Debido, principalmente, a esta última propiedad, algunos han sugerido que las armas de haces de partículas serían ideales de aprovecharlas como sistemas defensivos contra misiles. Se han propuesto tres aplicaciones de este tipo: un sistema contra proyectiles balísticos (ABM) instalado en un satélite en órbita terrestre, preparado para abatir proyectiles ofensivos en cuanto se eleven por encima de la atmósfera; un sistema radicado en buques, destinado a defenderlos contra los misiles crucero, y un sistema terrestre ABM, desarrollado para defender los silos de proyectiles contra los vehículos con cabezas nucleares dirigidos sobre los mismos.

UBICACION DEL ACELERADOR	ENERGIA MAXIMA (MEV)	INTENSIDAD MAXIMA (AMPERE)	DURACION DE CADA PULSO (NANOSEGUNDOS)	TASA DE REPETICION DE LOS PULSOS
STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER	20,000	.00003	2,500	360 POR SEGUNDO
SACLAY NUCLEAR RESEARCH CENTER	600	.0002	1,000	1,000 POR SEGUNDO
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY	400	.0001	1,500	1,000 POR SEGUNDO
UNIVERSITY OF GLASGOW	130	.0003	3,500	240 POR SEGUNDO
SANDIA LABORATORIES	1.5	4,500,000	80	3 POR DIA
HARRY DIAMOND LABORATORY	15	400,000	120	1 POR DIA
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY	1.6	20,000	30	5 POR HORA
SANDIA LABORATORIES	.35	30,000	30	100 POR SEGUNDO

PROPIEDADES de los aceleradores de partículas existentes en la actualidad. Nos permiten agrupar a estos dispositivos experimentales en dos grandes categorías: máquinas de alta energía y baja intensidad (*arriba*) y máquinas de baja energía y alta intensidad (*abajo*). Un acelerador de haces de átomos neutros de hidrógeno apropiado para un sistema ABM con base en satélites, debe ser capaz de generar un haz de energía de 200 millones de electronvolt (MeV), una intensidad comprendida entre uno y 10 ampère, una duración del pulso de 0,1 segundos y una capacidad de repetición de varios pulsos por segundo. Un acelerador de haces de electrones para abatir misiles crucero en la atmósfera debería generar un haz de una energía de 500 MeV, una intensidad de 5000 ampère, una duración de 100 nanosegundos por pulso y una tasa de repetición de 10.000 pulsos por segundo. A la izquierda, lugar de los aceleradores.

En cualquiera de estas tres aplicaciones, el sistema de armas de haces de partículas debería realizar las 12 operaciones consecutivas siguientes: detectar el objetivo; identificarlo entre otros posibles objetos; apuntar el haz hacia el objetivo y, si fuera necesario, seguir a éste en su movimiento; disparar el haz contra el objetivo; determinar si ha sido alcanzado; en caso de haberlo alcanzado, evaluar el daño producido; de no haberlo alcanzado, determinar la cantidad (en dirección y en distancia) de error; corregir el punto de mira del haz en razón del error calculado; disparar de nuevo el haz hacia su objetivo; determinar el daño causado o la distancia errada según los resultados del disparo; repetir el ciclo hasta que el objetivo quede abatido o tomar un nuevo objetivo, y comunicar los resultados de cada ráfaga de haces a un centro de mando.

Para acometer todas estas funciones, el sistema necesitaría, además del acelerador, equipos de otras clases. Sería necesaria una fuente de energía tanto para acelerar las partículas como para alimentar el resto del equipo. Se requeriría también un sistema de preparación y almacenamiento de energía que abasteciera al acelerador durante los cortos períodos en que se genera, acelera y dispara la ráfaga de haces de partículas. Habría que añadir un complemento de sensores (una combinación de dispositivos ópticos, infrarrojos y radáricos), capaces de localizar e identificar el objetivo, detectar si ha sido alcanzado, y, en caso afirmativo, evaluar la magnitud del daño causado. Finalmente, se necesitarían dispositivos de control para dirigir el haz y acoplar los sensores al mecanismo de direccionamiento a fin de que el haz pudiera seguir el movimiento del objetivo.

Vamos a considerar, por separado, las tres aplicaciones propuestas para el arma de haces de partículas. Para poderlas usar contra los proyectiles balísticos intercontinentales (ICBM) en su fase de propulsión, estos ingenios deberían desplegarse en numerosos satélites de órbita terrestre. A fin de constituir un sistema eficaz de defensa contra un ataque de ICBM enemigos dirigido a ciudades de Estados Unidos, debería cubrir todas las posibles bases de lanzamiento que el enemigo pudiera utilizar, no sólo las de su propio territorio sino de cualquier parte del océano desde donde sus submarinos nucleares puedan lanzar proyectiles balísticos contra Estados Unidos. Si las armas de haces de partículas estuvieran situadas en una órbita geosincrónica (es decir, una órbita a unos 40.000 kilómetros de altura que les permitiría permanecer estacionarias sobre un punto de la superficie terrestre), podrían observar prácticamente todo un hemisferio terrestre; con lo cual bastarían dos o tres satélites para controlar la totalidad de la superficie del globo. Pero si fuera así, a una distancia de 40.000 kilómetros no sería práctico disparar un haz de partículas contra un impulsor de ICBM. Por tanto, las armas deberían situarse en una órbita mucho más cercana a la tierra, quizá no superior a 1000 kilómetros de la superficie terrestre. Este tipo de despliegue tendría dos inconvenientes: cada satélite podría observar sólo una pequeña porción de la superficie terrestre, y los satélites se desplazarían con respecto a un punto fijo de dicha superficie.

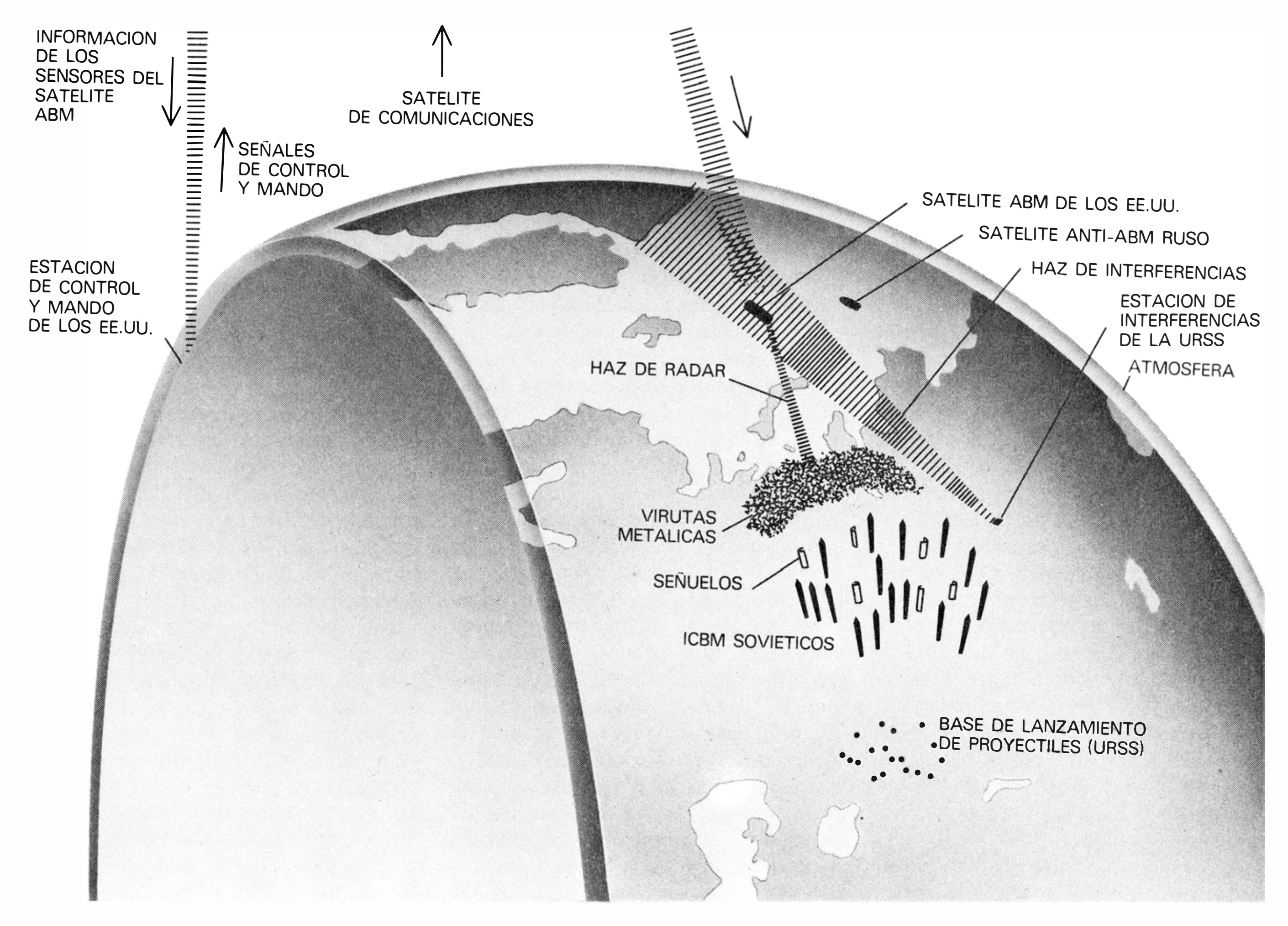
En consecuencia, sería necesario situar varios satélites cuidadosamente espaciados alrededor de la tierra, de modo que todo posible punto de lanzamiento de proyectiles pudiera ser cubierto permanentemente por un arma de haces de partículas, al menos. Un control completo a una altura de unos 1000 kilómetros exigiría unos 150 satélites. En el caso de producirse un ataque masivo y por sorpresa de la Unión Soviética contra los Estados Unidos, en el que probablemente los rusos lanzarían en rápida sucesión por lo menos todos sus ICBM almacenados en bases terrestres

de lanzamiento, este sistema de satélites tendría colocada adecuadamente sólo un arma de haces de partículas, la cual debería afrontar a unos 1000 ICBM que se elevarían casi simultáneamente de sus silos. Los restantes satélites quedarían fuera del campo de visibilidad de las bases de lanzamiento.

En general, la fase de impulsión de una trayectoria de ICBM dura unos ocho minutos, pero teniendo en cuenta el recorrido dentro de la atmósfera, el tiempo realmente disponible para este arma de haces de partículas para atacar y destruir los 1000 objetivos sería sólo de unos 400 segundos. Dentro de este intervalo de tiempo, el sistema debería ser capaz de detectar cada uno de los ICBM disparados mediante sensores ópticos o infrarrojos, identificarlo (posiblemente en medio de numerosos objetos) y determinar su velocidad y distancia respecto de la plataforma del arma mediante radar. A diferencia de un sistema ABM que utilice misiles con cabezas nucleares para interceptar los ICBM atacantes, un sistema de haces de partículas debe hacer diana directamente en el objetivo para destruirlo. Por medir la parte impulsora de un ICBM unos 10 metros de longitud, y ser próxima a los 1000 kilómetros la distancia a la plataforma, el radar debería determinar la posición del proyectil con una precisión angular de una parte sobre 100.000, hazaña que suele resultar imposible. Así pues, si el haz no alcanza su objetivo al primer intento, el sistema debe disparar varias veces por segundo contra cada uno de los 1000 objetivos, ajustando su puntería cada vez para compensar el error de distancia cometido en el disparo anterior.

El funcionamiento del arma de haces de partículas quedaría restringido por dos limitaciones físicas. En primer lugar, las leyes fundamentales de la física que gobiernan el movimiento de conjuntos de partículas cargadas en el espacio no permiten la propagación ilimitada de un haz de partículas cargadas en el vacío. Así, unos sencillos cálculos muestran que la mayoría de los haces electrónicos de 1 GeV de diámetro de un centímetro y de intensidad constante de 1000 ampère no se propagaría más allá de un metro del punto de salida del acelerador. Con lo cual, resulta que la clase real de haces de partículas cargadas, en principio más adecuada para uso militar, no podría ser utilizada como tal.

La segunda restricción es tan grave como la primera. Cada partícula del haz se halla sometida a una fuerza de repulsión debido a la carga del mismo signo que poseen las restantes partículas que lo integran. En un haz uniforme, la resultante de todas estas fuerzas que inciden sobre una partícula tiene una dirección radial y su sentido está dirigido hacia afuera: por tanto, el haz tiende a ser divergente y a dispersarse rápidamente desde su salida del acelerador. Si el haz se propaga en un gas, como la atmósfera terrestre, por ionización se producen suficientes cargas de signo opuesto en su proximidad inmediata que contrarrestan la fuerza de repulsión. Sin embargo, en el vacío del espacio exterior no tienen lugar tales efectos y, por tanto, sufrirá una drástica divergencia a causa de sus fuerzas de repulsión generadas en su propio seno. En el caso de un haz de



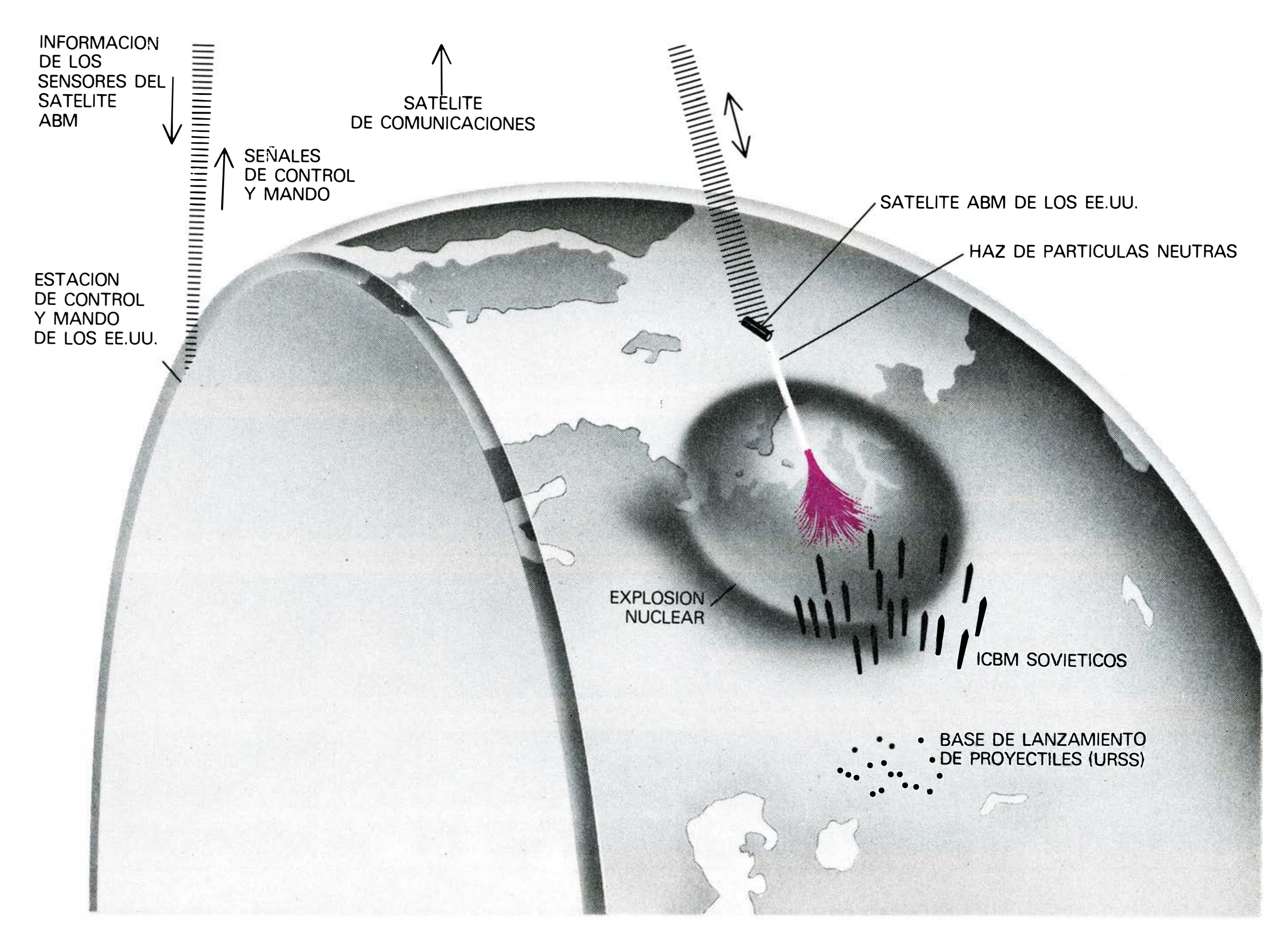
CONTRAMEDIDAS de que dispone un estratega militar que deba enfrentarse a un sistema ABM de haces de partículas instalado en satélites. Tal como muestra el montaje imaginario de la izquierda, el arma de haces de partículas puede ser destruida simplemente mediante una carga explosiva acarreada por un pequeño satélite que se halle en una órbita próxima. Alternativamente, podrían perturbarse las comunicaciones con la estación terrestre de control y mando (así como el radar de detección de proyectiles del satélite). Podrían desplegarse también objetos para confundir a los sen-

partículas a una velocidad cercana a la de la luz, el haz aparecerá en el marco de referencia terrestre como si hubiera pasado mucho tiempo antes de dispersarse. Realmente, un haz de electrones de 1 GeV de un centímetro de sección a la salida del acelerador se extenderá a un diámetro de cinco metros después de un recorrido de 1000 kilómetros, mientras que si el haz fuera de protones, y a la misma distancia, el diámetro sería de tres kilómetros. Un haz que se dispersa hasta abarcar un círculo de cinco metros de diámetro permite pensar en utilizarlo como arma, pero existe otro fenómeno físico que no hace suficientemente confiable su precisión para alcanzar el objetivo propuesto.

La tierra se halla envuelta por un campo magnético sujeto a notables e impredecibles variaciones de intensidad que dependen del lugar y del tiempo. Las partículas cargadas que atraviesan un campo magnético son desviadas de su dirección original en una cantidad inversamente proporcional al momento de las partículas y directamente proporcional a la intensidad del campo magnético. La incertidumbre en la magnitud de la desviación de un haz de partículas cargadas es proporcional a la incertidumbre en la intensidad del campo geomagnético en cada punto de la trayectoria del haz. Así, si el campo puede ser conocido con una precisión de por ejemplo una parte sobre 1000, la incertidumbre en la magnitud de la desviación sería de una milésima parte de la desviación total del haz. Puesto que el campo geomagnético podría desviar un haz electrónico de 1 GeV unos 1000 kilómetros en una distancia de 1000 kilómetros, la zona de incertidumbre en la posición del haz al final de su recorrido sería de un kilómetro. Lo cual excluye la posibilidad de dirigirlo con la precisión requerida para alcanzar un objetivo de una longitud de unos pocos metros.

¿Qué sucedería si se utilizaran haces de partículas neutras? Las partículas sin carga, como los neutrones o los rayos gamma, no presentan dificultades de propagación rectilínea en el vacío, pero precisamente a causa de su falta de carga eléctrica no pueden ser aceleradas ni concentradas en un haz. Pueden obtenerse neutrones de alta energía bombardeando un material con un haz intenso de protones procedentes de un acelerador. Un protón que penetra en un núcleo intercambia su carga con uno de los neutrones del núcleo y emerge como neutrón. La distribución angular de los neutrones emitidos por esta reacción tiende a presentar un máximo en la misma dirección que seguiría el rayo incidente. Sin embargo, el ángulo promedio con que un neutrón se desvía respecto del rayo de protones original es tal que, a una distancia de 1000 kilómetros, los neutrones quedarían esparcidos en un área de varios centenares de kilómetros cuadrados, y su densidad por unidad de superficie no sería suficiente para dañar al objetivo.

Los rayos gamma tienen el mismo inconveniente. Estos pueden generarse fácilmente haciendo pasar un haz intenso de electrones a través de un material que contenga núcleos pesados, como plomo o uranio. Los rayos emergentes se esparcirán, sin embargo, a una



sores del sistema o bien nubes de "virutas" metálicas para deslumbrarlos. El montaje de la derecha muestra una clase diferente de contramedidas, concebida específicamente para hacer frente a las armas de haces neutros de hidrógeno. Consistiría en hacer explotar una bomba nuclear de 100 kilotones en la capa superior de la atmósfera a fin de hacer subir suficiente aire a la trayectoria del haz para convertirlo en otro de protones, provocando con ello su dispersión. Todas esas contramedidas serían baratas, fáciles de acometer y difíciles de contrarrestar por el sistema ABM.

distancia de 1000 kilómetros en un área de varios kilómetros cuadrados. Por tanto, tampoco resulta práctico producir un haz de rayos gamma con propósitos militares.

¿Sería posible acelerar átomos cargados y, después de concentrarlos en un haz, neutralizarlos antes de salir al vacío espacial? Podría realmente realizarse esta operación con átomos de hidrógeno. El átomo de hidrógeno está formado por un núcleo de carga positiva (un solo protón) y un electrón en órbita a su alrededor; así pues, el átomo considerado en conjunto es neutro. Pero podemos añadir a esta configuración un segundo electrón y obtener un átomo cargado negativamente. Estos átomos pueden acelerarse a altas energías y concentrarse en un haz. Una vez formado éste y centrado, sus átomos pueden ser convertidos en neutros quitándoles los electrones añadidos. Por tanto, sería posible (por lo menos en principio) generar un haz intenso de hidrógeno con carga neutra y de alta energía que fuera adecuado para usarlo como arma.

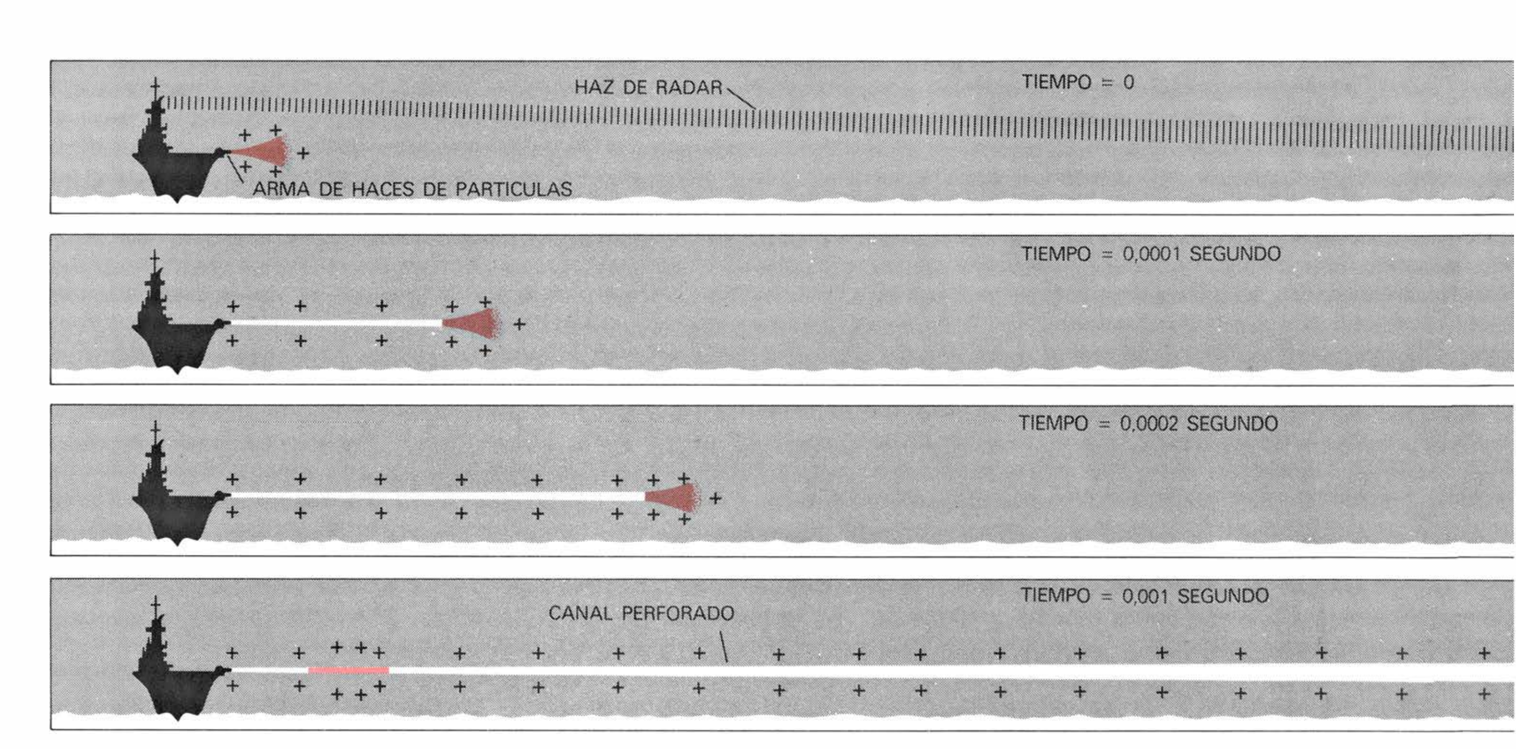
La eliminación de los electrones sobrantes puede efectuarse con un grado razonable de eficacia, aunque a costa de cierta dispersión del haz, haciendo pasar los átomos de hidrógeno cargados a través de algún gas enrarecido. A una distancia de 1000 kilómetros, un haz neutro de dos centímetros de diámetro se dispersaría en un diámetro cercano a los 20 metros; a una distancia de 40.000 kilómetros, el diámetro del haz resultaría de 800 metros. Este grado de dispersión podría ser mantenido si los magnetos que dirigen y concentran el haz de átomos cargados pudieran protegerse del campo geomagnético y pudieran sostener una intensidad estable y predecible con una precisión de una parte sobre un millón. Lo cual, aunque posible, no se considera práctico.

¿Qué energía e intensidad debe poseer un haz para que infrinja un daño, detectable a 1000 kilómetros de distancia, a un ICBM que se eleve de la atmósfera? Un daño detectable sería el que resultara de abrir un hueco por fusión en las paredes del depósito de combustible del proyectil, o de explotar el detonante químico de sus cabezas nucleares. El haz debería depositar unos 2000 joule por centímetro cúbico de material en el primer caso, o alrededor de 200 joule por centímetro cúbico en el segundo.

Considérese un haz de partículas de 200 MeV que ilumine una zona que comprenda un millón de centímetros cuadrados en el objetivo. No todas las partículas del haz interceptarían el objetivo. La mayor parte lo dejarían atrás y se perderían. Puesto que un protón de 200 MeV puede depositar cerca de 10^{-12} joule por cada centímetro de trayectoria a través de un material ligero, sería necesario el impacto de unas 2×10^{15} partículas por centímetro cuadrado de objetivo para llegar a depositar un total de 2000 joule por centímetro cúbico. En el supuesto de que el haz fuera uniforme, el número total de partículas que lo formaran debería ser por tanto de 2×10^{21}. Con lo cual la energía total del haz vendría a ser del orden de 6×10^{10} joule.

La potencia requerida del haz depende de la rapidez con que se tenga que depositar la energía necesaria para destruir el objetivo. Un haz de 6×10^{10} watt depositaría los 6×10^{10} joule necesarios en un segundo de continua aportación. Pero se necesitaría un haz de una potencia 10 veces superior (6×10^{11} watt) para conseguir el mismo daño en una décima de segundo. En la práctica, este aumento podría obtenerse multiplicando por 10 el número de partículas del haz. Si el mecanismo que se intenta destruir fuera la detonación de los explosivos químicos de las cabezas nucleares, sólo se requeriría la décima parte de esta energía. Aunque no existe un límite inferior absoluto en el tamaño y dispersión de un haz intenso al final de un acelerador, resultaría extremadamente difícil producir un haz de la intensidad y finura necesarias para abatir un proyectil a una distancia de 1000 kilómetros. Ciertamente, la tecnología actual queda lejos de poder lograr tal haz.

Considérese ahora el tipo y tamaño de



SEGUNDA APLICACION PROPUESTA para las armas de haces de partículas. Dicha misión consistiría en una defensa con base en buques contra misiles crucero. Un misil crucero atacante probablemente volaría hacia el buque a sólo unos pocos metros por encima del nivel del mar, a fin de evitar su detección por parte del radar del buque hasta que se halle a una distancia aproximada de un kilómetro. El proyectil recorrería el último kilómetro en unos cuatro segundos, durante los cuales el arma de haces de partículas cargadas a bordo del buque debe ser capaz de combatirlo y abatirlo. Una ráfaga de electrones con una energía de 1 GeV, una intensidad de 5000 ampère y una duración de una décima de microsegundo podría, en principio, perforar un canal en la atmósfera a través del cual pulsos subsiguientes podrían llegar al proyectil con pocas pérdidas de energía. No

la fuente de energía que se necesitaría para hacer funcionar un acelerador capaz de producir un haz de 6×10^{10} watt durante un segundo. Suponiendo que la eficacia de conversión de la energía primaria de la fuente a la energía del haz fuese del 40 por ciento, por cada ráfaga se requeriría una cantidad de energía de $1{,}5 \times 10^{11}$ joule. La energía que almacenan los explosivos de alta potencia es de 4000 joule por gramo. Por tanto, debería suministrarse 37,5 toneladas de explosivos de alta potencia por segundo a los generadores magnéticos para proporcionar la energía necesaria al haz. En caso de acoplar un generador del mismo tipo que los que impulsan cohetes, se necesitarían varias docenas de toneladas de combustible sólido para obtener un haz de la misma energía, ya que la eficacia de conversión de combustible de cohete a electricidad se sitúa entre el 10 y el 20 por ciento para la generación de energía en intervalos de tiempo iguales a los de la ráfaga. En cuanto a la posibilidad de utilización de explosivos nucleares como fuente de energía para el arma de haces de partículas, los problemas que surgirían para el control de la energía y de la radiación los hace inadecuados.

Es posible que un haz 100 veces más débil pueda dañar al computador electrónico del ICBM; en este caso, bastarían sólo unos centenares de kilogramos de explosivo por segundo para obtener la energía necesaria. Sin embargo, el daño causado en el proyectil podría ser difícilmente detectable a una distancia de 1000 kilómetros. Y por tanto, el operador del arma de haz de partículas no podría saber si el ICBM resultó incapacitado, pudiendo cesar el fuego y dirigirse a otro objetivo. Esto podría constituir un grave defecto operacional para el conjunto del sistema, puesto que el tiempo que puede dedicar a cada ICBM que despegue es escaso.

Un arma de haz de partículas que emplee partículas neutras adolece de otro serio inconveniente. Le sería imposible determinar la cantidad y la dirección del error de puntería a un objetivo. Por tanto, estaría obligada a efectuar disparos "a ciegas", basándose en las calibraciones predeterminadas de los magnetos de direccionamiento, procedimiento que no aseguraría el impacto a ninguno de los objetivos.

Todas estas dificultades llevan a la conclusión de que, aun cuando fuera posible construir un acelerador capaz de producir un haz de átomos de hidrógeno de suficiente intensidad y energía para dañar a un ICBM en su fase de propulsión, un sistema ABM con armas de haces de partículas situadas en satélites artificiales no sería viable. Incluso en un medio favorable, el sistema tendría gran dificultad en localizar e identificar a los ICBM. No podría combatirlos todos a la vez, requeriría docenas de toneladas de explosivos por ráfaga si ha de disparar con rapidez y causar daños visibles, y no podría ajustar la puntería del haz si no se produjera un daño detectable. Además, la eficacia del sistema podría quedar fácilmente neutralizada por una multitud de contramedidas disponibles.

Consideremos a continución la primera de las dos aplicaciones endoatmosféricas propuestas para un arma de haces de partículas cargadas, es decir, la defensa de buques contra los misiles crucero. Generalmente, un misil crucero, a fin de evitar su pronta detección, volará hacia un barco sólo a unos pocos metros de la superficie del agua, con lo cual el radar del buque no podrá detectarlo hasta que lo tuviera a un kilómetro más o menos. Volando a la velocidad del sonido, el proyectil recorrerá el último kilómetro en unos cuatro segundos, durante los cuales el arma de haces de partículas cargadas del buque debería atacarlo y abatirlo. Esto significa que el haz de partículas cargadas tendría que recorrer quizás un kilómetro a través de la atmósfera y conservar suficiente energía para dañar al objetivo.

Imagínese un haz de 5000 ampère de electrones de 500 MeV saliendo del acelerador hacia un objetivo a un kilómetro de distancia. En su recorrido a través de la atmósfera, las partículas chocarán frecuentemente con las moléculas del aire, y perderán parte de su energía cinética en cada colisión. Este proceso ocasionaría tres notables efectos: (1) la energía perdida por las partículas calentaría el aire en las proximidades inmediatas al haz, y crearía por ionización gran cantidad de átomos con carga positiva y electrones libres en torno a éste. (2) Las nuevas cargas positivas reducirían el campo eléctrico neto de las partículas del haz. (3) Al mismo tiempo, el campo magnético generado por el propio chorro de electrones del haz tendría a contrarrestar las fuerzas de repulsión existentes entre las partículas que normalmente dispersan un haz cargado en el vacío. Este efecto tendería a confinar al haz electrónico en un canal estable.

Por otro lado, a medida que los electrones del haz vayan colisionando con las moléculas del aire, se irán apartando de su dirección inicial de movimiento. Esta dispersión será acumulativa; de modo que un haz de electrones de 500 MeV de un diámetro de cuatro centímetros a la salida del acelerador presentará un diámetro de 14 metros a la distancia de 400 metros, y un diámetro de 132 metros a un kilómetro. Además, los choques restarán energía al haz; de suerte que, a una distancia de 400 metros del acelerador, los electrones poseerán sólo cerca del 30 por ciento de su energía cinética inicial, y a una distancia de un kilómetro sólo conservarán alrededor del seis por ciento. Así pues, aunque un haz de electrones de alta energía pudiera propagarse en la atmósfera a un kilómetro de distancia del acelerador llegaría tan disperso y debilitado que no podría infringir ningún daño al proyectil objetivo.

La verdad es que este haz no puede propagarse. Los experimentos realizados con haces de partículas cargadas han mostrado que los haces largos sufren lo que los físicos denominan inestabilidades magnetohidrodinámicas: los haces se retuercen y se enroscan como una manguera de jardín o se concentran y se abren como una tira de salchichas. Una vez instauradas estas inestabilidades tienden a crecer hasta desorganizar completamente el haz. La dispersión de éste tiende a ser mucho más pronunciada en un haz de protones de la misma energía; dicho haz se abriría formando una nube amorfa de protones a escasas docenas de metros del acelerador.

El examen anterior indica que las numerosas colisiones que sufriría un haz de protones o de electrones al atravesar la atmósfera reducirían tan severamente

MISIL CRUCERO

obstante, todavía deben solventarse experimentalmente muchas cuestiones importantes acerca de las propiedades de propagación de haces de partículas cargadas en la atmósfera, antes de concluir que estos pulsos poseerían suficiente energía para destruir un misil crucero a 1 km de distancia.

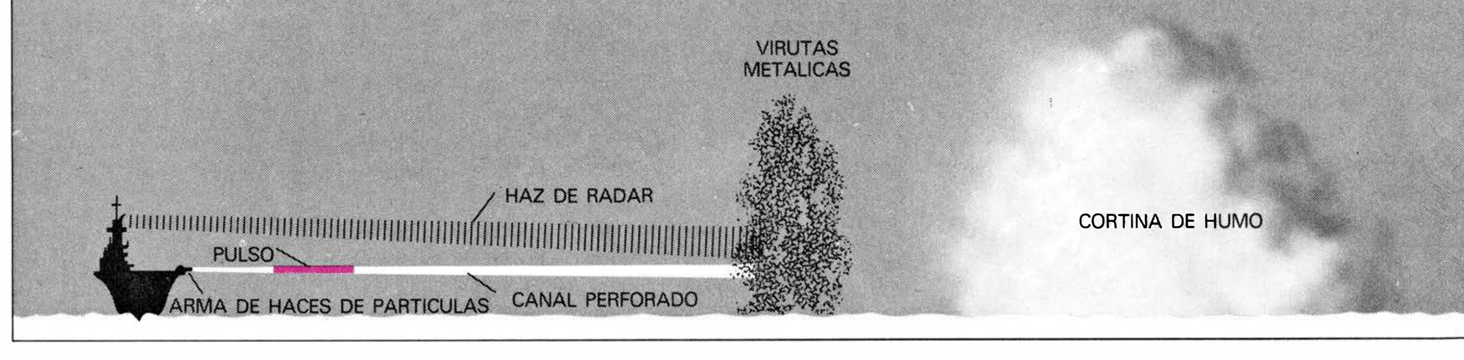
el número de partículas que pudieran impactar al objetivo y disminuirían en tal cantidad la energía contenida en el haz que un haz continuo no resultaría mecanismo de destrucción apropiado, a ninguna distancia útil. Estos problemas tampoco se solventarían apreciablemente si se demorase el disparo contra el misil crucero hasta que se encontrara sólo a unos centenares de metros del buque, con el inconveniente de que el tiempo disponible para poder disparar quedaría reducido a cerca de un segundo. Una alternativa para disminuir las pérdidas de partículas y de energía del haz consistiría en reducir el número de choques a base de reducir el número de moléculas de aire en el espacio que debe atravesar el haz, para llegar desde el acelerador al objetivo. En pocas palabras, debería taladrarse un hueco en la atmósfera a través del cual el haz podría propagarse con poca dispersión de las partículas y con pérdidas mínimas de energía. Esta posibilidad puede ser analizada teóricamente.

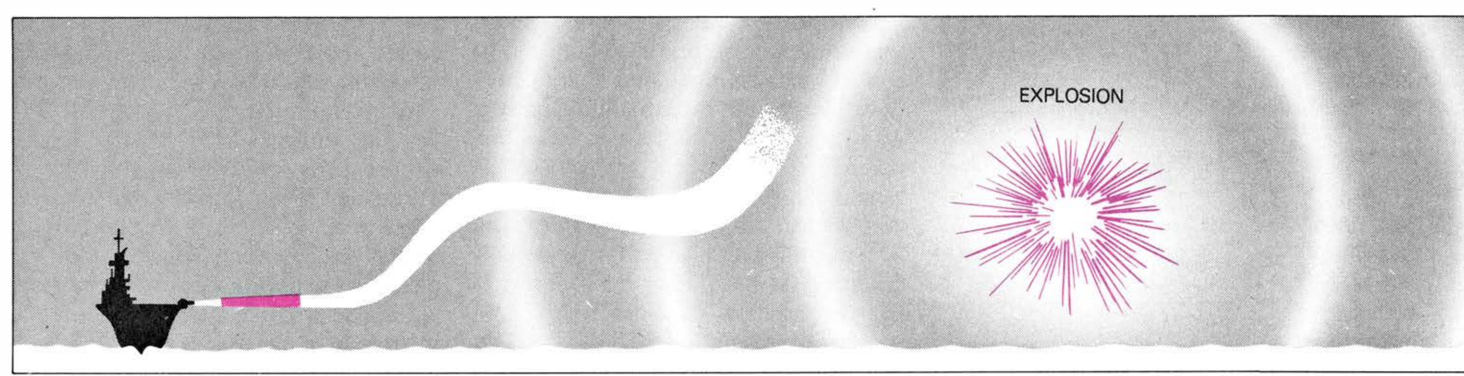
Considérese un haz de electrones de 5000 ampère y 1 GeV, de dos centímetros de diámetro y de una duración de una décima de microsegundo. Debido a que los electrones corren prácticamente a la velocidad de la luz, la ráfaga de 0,1 microsegundos dirigida contra el objetivo poseería una longitud de unos 30 metros. La energía total transportada por los electrones de esta ráfaga sería de 500.000 joule. Los electrones de esta ráfaga no sólo perderían energía por colisión contra las moléculas del aire, sino también por radiación. La pérdida de energía por colisión en el aire de estos electrones de alta energía alcanzaría los 2000 electronvolt por centímetro, y la velocidad de pérdida debida a la radiación en el aire sería unas 10 veces superior. Por tanto, cuando un haz de este tipo empezara a recorrer el aire depositaría energía a la tasa de tres millones de watt por centímetro cúbico a través de la ionización y unas 10 veces esta cantidad a través de la radiación emitida, en su mayor parte, en la propia dirección del haz. Esta energía se depositaría en las moléculas de aire interceptadas por el haz; con el tiempo se manifestaría en forma de aumento de la presión del aire calentado en las proximidades inmediatas del haz. El efecto predominante de este aumento de presión consistiría en un desplazamiento radial hacia afuera de las moléculas de aire. El aire caliente de poca densidad remanente tras la ráfaga actuaría de canal a través del cual los pulsos siguientes podrían propagarse con menor dispersión y menor pérdida de energía.

Supóngase ahora que se desee obtener un canal en el que la presión fuera la décima parte de la atmosférica. Esto significaría que el aire del interior del canal, de una longitud de un kilómetro y por lo menos de un centímetro de radio, debería calentarse a una temperatura de unos 3000 grados Celsius, tarea que requeriría 1,5 millones de joule de energía. Puesto que cada ráfaga poseería 500.000 joule de energía, bastarían muy pocas para disminuir la densidad en el interior del canal a la décima parte de la presión atmosférica. (Este es un cálculo ideal en el que se ha supuesto que toda la energía transportada por cada ráfaga sería absorbida por el canal, lo cual no es cierto en la realidad.) Este cálculo muestra que sería factible perforar un canal semejante, dirigido contra un objetivo situado a un kilómetro; y si bien no bastarían unas pocas ráfagas, quizá serían suficientes varias docenas de ráfagas del haz hipotéticamente supuesto en este ejemplo. Los electrones de 1 GeV que se propagasen en este canal no perderían más del 20 por ciento de su energía inicial, y el diámetro del haz se multiplicaría sólo por tres un kilómetro más adelante.

Un método alternativo sería utilizar un laser de alta intensidad para perforar este canal. La radiación de un laser de una longitud de onda típica de 10 micras es fuertemente absorbida por la atmósfera y necesitaría un espejo de un metro de diámetro para formar un hueco de un centímetro a una distancia de un kilómetro. La fabricación de este espejo sería técnicamente factible.

Este rudimentario análisis de la pro-

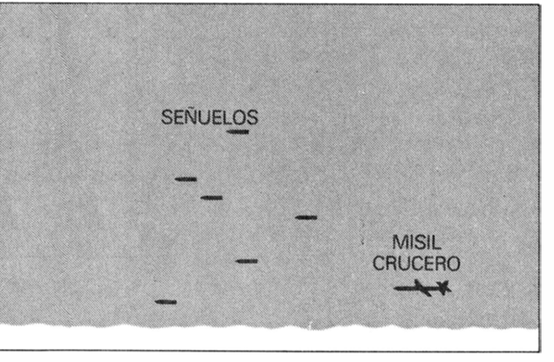


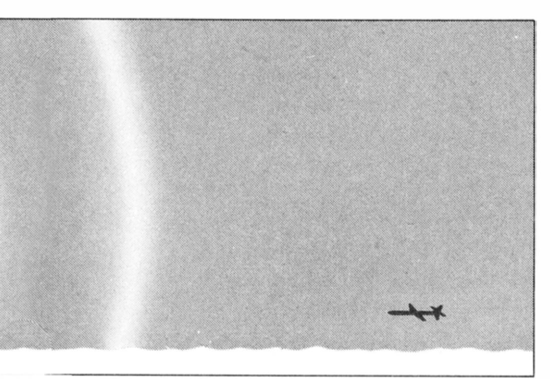


CONTRAMEDIDAS eficaces contra un arma de haces de electrones antimisiles crucero con base en un buque. Tal como muestra la escena superior, una nube de virutas metálicas, un cohete de humo, o una multitud de señuelos podría ser disparado enfrente al objeto de confundir los sistemas de defensa del buque. (Las virutas incluso podrían tener el efecto adicional de descomponer la ráfaga de electrones). Alternativamente, como muestra

pagación de una ráfaga de haz de electrones nos muestra que los electrones pueden propagarse establemente, pero el análisis resulta todavía incompleto. No hemos considerado los efectos resultantes de la segmentación del haz en pulsos y de la propagación posterior de varios miles de pulsos por segundo. Hemos ignorado el hecho de que cada pulso iría seguido por una estela electromagnética, análoga a la formada en el agua por una lancha rápida, y que la estela de un pulso afectaría al comportamiento del siguiente. No hemos considerado los efectos no lineales que tendrían lugar en haces de tan altas intensidades. Por último, tampoco hemos tenido en cuenta el comportamiento hidrodinámico del canal calentado. ¿Durante cuánto tiempo permanecerá abierto el canal? ¿Qué sección debería tener para admitir un haz de dos centímetros de diámetro? ¿Qué efectos y condiciones podrían predecirse y reproducirse? Todas estas preguntas permanecen abiertas y deben responderse experimentalmente.

Las pruebas experimentales existentes muestran que un haz de electrones de baja energía (del orden de 10 MeV) se propaga bien hasta unos pocos metros en un canal de una densidad comprendida entre una centésima y una milésima parte la densidad de la atmósfera. Sin embargo, se ignora cómo se comportarían los pulsos de electrones de alta energía, especialmente en una trayectoria de un kilómetro. En caso de que todas estas cuestiones se resolvieran satisfactoriamente, un haz de electrones de unos pocos centenares de ampère podría propagarse a través de la atmósfera en forma de, por ejemplo, un tren de pulsos de 0,1 microsegundos con una velocidad de repetición de 10.000 por segundo, a una distancia de un kilómetro, y conservar suficiente energía para destruir un misil crucero, a condición, por supuesto, de que el haz consiga un impacto directo. (Esta última condición implica múltiples problemas operacionales para un sistema de armas de haces de partículas contra misiles crucero, que discutiremos más adelante.)





la escena inferior, podría dispararse un pequeño cohete explosivo para interrumpir el canal abierto por donde tienen que propagarse las ráfagas.

Considérese a continuación un haz de partículas cargadas que actúe como interceptor en un sistema ABM de defensa de silos de proyectiles contra vehículos "entrantes" ["reentry vehicles": se refiere a las cabezas de los misiles que en las postrimerías de su trayectoria balística entran de nuevo en la atmósfera para alcanzar su objetivo] dotados de bombas nucleares. En este caso, habría que emplazar el arma de haces de partículas cargadas cerca de una agrupación de silos. El haz debería perforar un hueco a través de la atmósfera hasta llegar al objetivo, al igual como debería hacerlo un contramisil crucero, pero los criterios de actuación serían algo distintos. Un vehículo entrante moderno se aproximaría al silo a varias veces la velocidad del sonido y, por tanto, tardaría menos de un segundo en recorrer el último kilómetro. Además, el arma de haces de partículas tendría que poder proteger su propio radar, que podría ser destruido físicamente por una bomba nuclear de un megatón que explotara a una distancia de dos kilómetros o incluso más lejos. Por consiguiente, para que el haz pueda cumplir su misión ABM, resulta fundamental que sea capaz de propagarse varios kilómetros en la atmósfera y de destruir un vehículo entrante intruso, a una distancia de unos pocos kilómetros. Entonces, si el haz no tuviera completamente neutralizadas sus cargas por las cargas positivas que crearía al atravesar la atmósfera, sería desviado por el campo magnético terrestre. Este efecto daría lugar a una incertidumbre en su puntería de varias docenas de metros a una distancia de unos pocos kilómetros. Puesto que el objetivo mediría generalmente una longitud de un metro y una anchura todavía menor, la magnitud de este intervalo de confianza en la puntería de un arma ABM de haces de partículas constituye una grave objeción sin fácil remedio tecnológico. Además, cuando se consideran las necesidades operacionales de este sistema, resulta claro que un atacante sin espíritu de colaboración podría complicar todavía más su funcionamiento provocando perturbaciones del campo magnético terrestre de forma arbitraria y aleatoria, o deslumbrando el radar del sistema.

Hasta ahora hemos examinado si las leyes físicas que rigen el comportamiento de los haces de partículas permitirían la generación y propagación de un haz suficientemente potente para destruir un objetivo. Hemos visto que, en principio, parece posible, pero en la práctica extraordinariamente difícil, formar un haz de hidrógeno neutro que pudiera propagarse a 1000 kilómetros en el vacío espacial y depositar suficiente energía a un impulsor de ICBM para destruirlo; y que un haz intenso de electrones a pulsos podría quizá propagarse a un kilómetro o más en la atmósfera inferior y conservar energía suficiente para destruir, al final de su trayectoria, el objetivo impactado. El estado actual de la tecnología de los Estados Unidos y de la Unión Soviética, ¿está suficientemente avanzado como para posibilitar a ambos la construcción de los aceleradores requeridos para generar los haces de partículas con las características que exige un tal sistema de armamento?

Un arma de haces de partículas para operar en el exterior de la atmósfera (exoatmosférica) necesita una máquina que pueda acelerar hidrogeniones con carga negativa a unos pocos centenares de MeV. Para experimentación en física nuclear tales átomos son acelerados de un modo rutinario en aceleradores lineales como los existentes en el Argonne National Laboratory y en la unidad de física de mesones de Los Alamos Scientific Laboratory. Los recientes avances tanto en Estados Unidos como en la Unión Soviética indican que sería técnicamente factible el desarrollo de las fuentes muy intensas de iones negativos de hidrógeno necesarias, así como un mecanismo de aceleración adecuado para generar el intenso haz requerido para un arma en el exterior de la atmósfera. Una valoración optimista afirmaría que si se encontrara un procedimiento para generar haces muy compactos de iones, podría construirse en la próxima década un acelerador de iones negativos de hidrógeno capaz de obtener un haz de una intensidad inicial de 10 ampère, de una energía inicial de 200 MeV y de una sección eficaz de varios metros cuadrados a una distancia de 1000 kilómetros. Este acelerador mediría una longitud de 20 metros y su eficiencia de conversión de energía, desde su preparación hasta la salida del haz, sería del 50

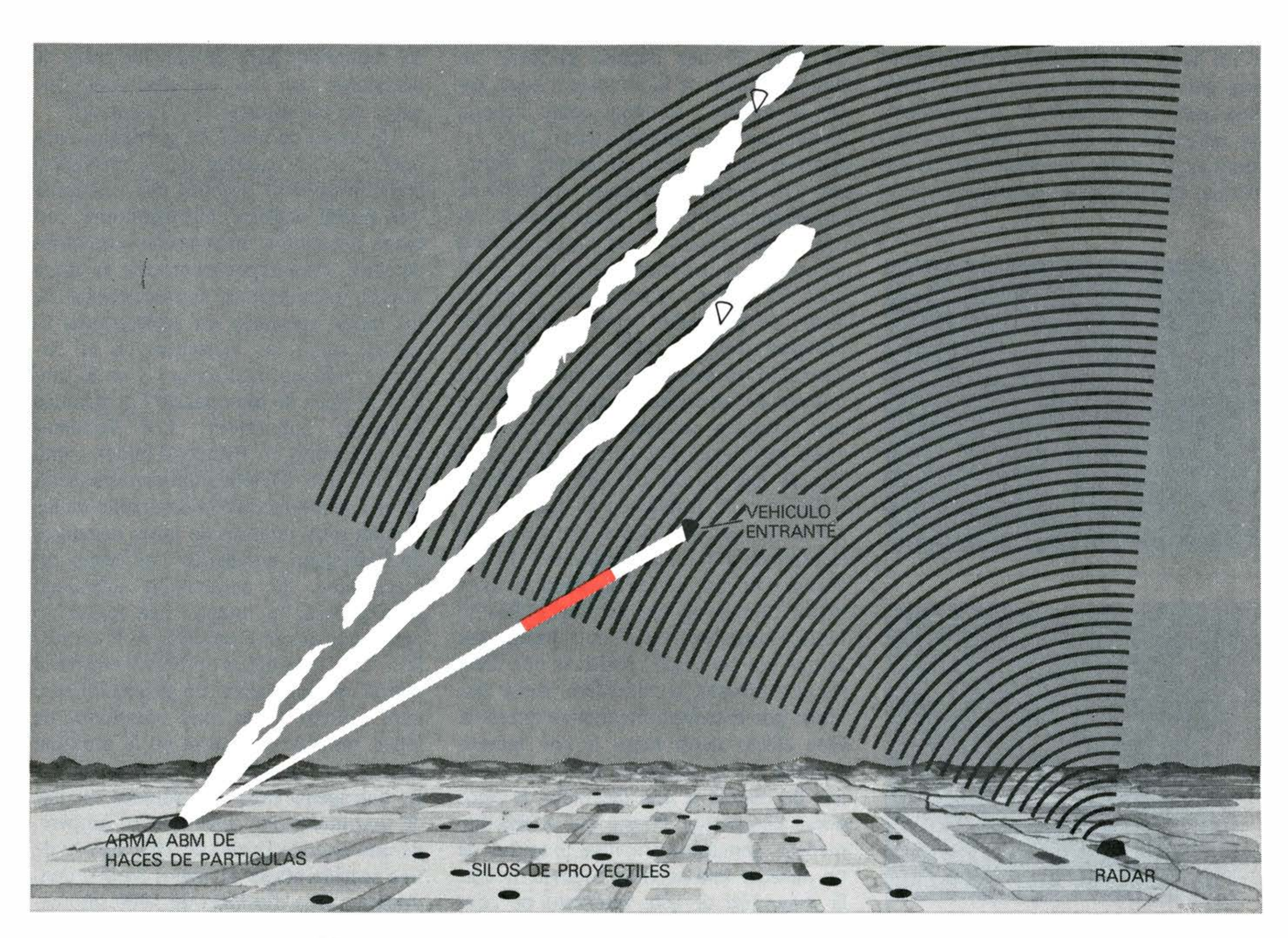
por ciento. Su haz podría dañar al impulsor del proyectil con aproximadamente 10 segundos de deposición continua a una distancia de 1000 kilómetros, y descomponer los circuitos electrónicos del ICBM en una décima de segundo a la misma distancia.

En cuanto a las armas a utilizar en la atmósfera (endoatmosféricas), ya se dispone de la tecnología para construir un acelerador lineal de electrones de alta intensidad y alta energía, capaz de producir los pulsos apropiados. El acelerador lineal de inducción puede generar pulsos cortos de muy alta intensidad, y ha sido desarrollado tanto en los Estados Unidos como en la Unión Soviética. El acelerador lineal de inducción construido en 1970 en la Universidad de California en Berkeley puede conseguir un haz de 1200 ampère y 4 MeV. Una máquina similar que pudiera producir un rayo de 1 GeV mediría unos 500 metros de longitud y pesaría unas 250 toneladas. Las cuestiones técnicas por resolver consisten en averiguar si es posible alcanzar tanto la velocidad de repetición requerida de varios miles de pulsos por segundo (aspecto fundamental para el funcionamiento de un arma endoatmosférica de rayos de partículas cargadas) como la suficiente compacidad del haz. En resumen, no parece existir razón alguna que impida a la tecnología de aceleradores construir, en algún momento del futuro, los aceleradores adecuados para las armas de haces de partículas.

Finalmente, examinaremos 3 nuevas cuestiones: ¿Cuáles son los requisitos operacionales que cada una de las tres aplicaciones arriba descritas impondrían a un arma de haces de partículas? ¿Cuáles son las contramedidas que un oponente puede dirigir contra este sistema? A la vista de estos problemas, ¿sería práctica o al menos merecería la pena considerar la viabilidad de un arma de haces de partículas?

Cada una de las 150 armas de haces de partículas ubicadas en satélites a 1000 kilómetros sobre la tierra de un sistema de defensa que visualizara los impulsores de los proyectiles balísticos debería comportar un acelerador, una fuente de energía, un sistema de almacenamiento de energía y subsistemas para detección y seguimiento de objetivos, direccionamiento del haz y verificación del daño. Cada arma de haces de partículas había de detectar, identificar y seguir simultáneamente, por lo menos, 1000 impulsores mientras estén todavía en la fase de impulsión, que finaliza al cabo de unos 400 segundos. El mecanismo de seguimiento y puntería debería ubicar a cada impulsor con una precisión de una parte sobre 100.000.

El mecanismo de puntería del haz neutro consistiría en lentes magnéticas precalibradas y magnetos de focalización, que podrían ser controlados mecánicamente para una más fina puntería con la ayuda de un telescopio óptico. Este mecanismo podría complementarse con un sistema de retroalimentación de modo que, mientras se siguiera al objetivo, el punto de mira del haz permaneciera constantemente sobre él. El mecanismo de puntería dirigiría primero el haz de hidrógeno cargado negativamente al objetivo y, luego, lo haría pasar a través del gas enrarecido para su neutralización. Como no sería posible deter-



TERCERA APLICACION PROPUESTA para las armas de haces de partículas. Se trata de su utilización en un sistema ABM destinado a defender los silos de proyectiles de Estados Unidos contra los vehículos "entrantes" soviéticos, dotados de bombas nucleares. Si la defensa tuviera que esperar a que cada bomba atacante se aproximara a un kilómetro antes de combatirla, el arma de haces de partículas tendría que destruirla en 0,7 segundos, tiempo en que la bomba recorrería el último kilómetro antes de llegar a su objetivo. Los disparos sucesivos necesitarían perforar nuevos canales.

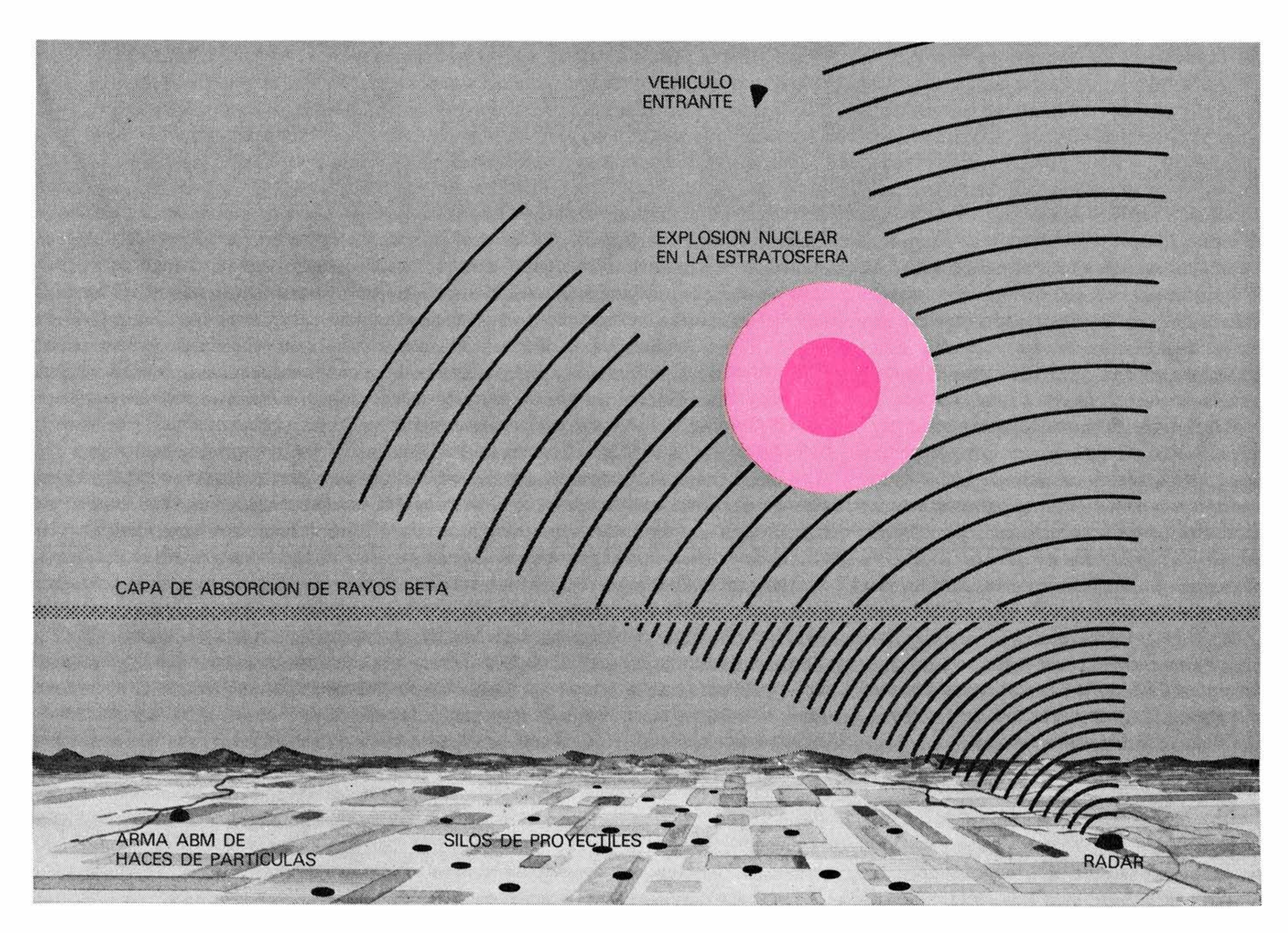
minar la cantidad y la dirección del error de puntería del disparo, sería preciso disparar repetidamente y a ciegas hasta que se observaran resultados catastróficos. Este procedimiento costaría tiempo: el tiempo total de un disparo simple, aproximadamente 0,4 segundos, estaría formado por el tiempo que tardaría el haz en alcanzar el objetivo a una distancia de 1000 kilómetros, el tiempo que demoraría una señal óptica en regresar a la plataforma para indicar un impacto, el tiempo necesario para que la señal llegue a la estación terrestre de control a través de un satélite geosincrónico y el tiempo que necesitaría el mando de retorno para ordenar el arma que vaya a otro objetivo.

Una alternativa a este proceso tan lento consistiría en preprogramar el sistema de armas que disparasen a ciegas contra un blanco durante un período fijo y, luego, pasar a otro objetivo sin previa indicación de impacto positivo. Este enfoque no parece satisfactorio por dos razones. En primer lugar, el haz de partículas podría errar sistemáticamente todos los objetivos. En segundo lugar, si los proyectiles balísticos atacantes se dirigieran a ciudades de Estados Unidos, la posibilidad de que algunos de ellos –aunque fueran pocos– alcanzaran sus blancos causarían daños impensables a muchos centros urbanos e industriales. Por tanto, este procedimiento alternativo sería inaceptable para la protección de dichas zonas.

Tampoco es cierto, además, que el radar y otros sensores puedan determinar la posición de un objetivo con la precisión requerida de una parte sobre 100.000, ni siquiera de una parte sobre 10.000. No parece, pues, posible disparar con precisión y rapidez contra un impulsor ICBM mediante un haz de átomos de hidrógeno neutros a una distancia de 1000 kilómetros. Por consiguiente, aun cuando pudiera construirse un acelerador apropiado de hidrógeno cargado negativamente continuaría siendo técnicamente impracticable el despliegue de un arma de haces de partículas que fuera eficaz, desde el punto de vista operativo, contra un ataque masivo de ICBM sobre Estados Unidos.

Hay que tener en cuenta que este sistema de defensa contra los proyectiles balísticos operaría en su mayor parte a la vista del territorio enemigo. Considérese entonces las contramedidas que un estratega militar puede aplicar para enfrentarse a la amenaza de un sistema ABM de haces de partículas instalado en satélites. El método más obvio consistiría en destruir las armas de haces de partículas.

Las armas que en tiempo de paz se hallen en el espacio serían vulnerables a cargas explosivas modestas llevadas por pequeños satélites situados en una órbita cercana. Es más que posible que un arma de haces de partículas ubicada en el espacio tuviera que transmitir, en el curso de sus operaciones, la información obtenida de sus sensores de detección, identificación y verificación del daño impactado para ser controlada por una estación terrestre. El control terrestre debería por lo menos asignar prioridades, poner al sistema en situación de disparar y conducir el ataque contra los ICBM que se eleven. La perturbación del enlace entre el arma y su control te-



CONTRAMEDIDA que desbarataría con toda seguridad un "duro" sistema ABM que utilice haces de partículas cargadas. La explosión de una bomba nuclear en la estratosfera sobre los silos de proyectiles deslumbraría al radar del sistema ABM o descompondría los canales por los cuales los pulsos de partículas cargadas se propagan en la atmósfera. De modo alternativo, una explosión nuclear también cerca de la superficie terrestre, aunque se produzca a varios kilómetros de distancia, serviría de detección para desbaratar el radar que se provocara y deshacer el haz de partículas.

rrestre equivaldría a la neutralización de la propia arma. Esta interferencia es posible.

Otras contramedidas a las que un enemigo puede recurrir serían el establecimiento de interferencias para el radar de detección del sistema y el despliegue de señuelos para confundir los sensores del sistema. El enemigo podría desplegar una nube de "virutas metálicas" (tiras delgadas de aluminio, por ejemplo) sobre los ICBM, de modo que, aunque el sistema de haces de partículas pudiera detectar por radar la ubicación general del objetivo, no podría ver a través de la nube ni apuntar el haz con la precisión necesaria para alcanzar los ICBM. Puesto que las virutas pueden ser transportadas por el impulsor del proyectil, estas contramedidas se mostrarían eficaces tanto para los ICBM lanzados desde el mar como para los lanzados desde tierra firme.

Otra contramedida eficaz contra un arma de haces de hidrógeno sin carga situada en el espacio consistiría en interponer una capa delgada de aire entre ella y el ICBM atacante durante su fase de impulsión. Un haz de hidrógeno sin carga de 200 MeV se convertiría en un haz de protones si pasara a través de una capa de aire, aunque fuera delgada. Un haz de protones cargados de esta energía se dispersaría rápidamente y nunca alcanzaría el objetivo. Calculamos que una bomba nuclear de 100 kilotones que explote en el límite superior de la atmósfera proporcionaría la energía necesaria para levantar suficiente aire al espacio exterior y dispersar un haz de partículas neutras. Todas estas contramedidas serían bastante baratas, fáciles de implementar e imposibles de salvar. Y puesto que podrían anular previsiblemente un sistema ABM de armas de partículas instalado en satélites, carecería de sentido desarrollar esta arma, incluso aunque fuera tecnológicamente posible construir el acelerador requerido.

Consideremos a continuación las necesidades operacionales de un arma de haces de electrones en la atmósfera proyectada para combatir un misil crucero que se dirija contra un buque. Si el arma no abatiera al misil en la primera andanada, debería seguirlo y disparar de nuevo. No se conoce exactamente la rapidez con que el arma podría repetir el disparo contra un objetivo que se desplace lateralmente respecto del buque. Para disparar así, el haz habría de abandonar el canal perforado en la atmósfera en el que se había propagado inicialmente y taladrar un nuevo hueco cercano al anterior. Se ignora si la atmósfera podría soportar este proceso. También se ignora de qué modo dependerá este tipo de acción con respecto al movimiento del objetivo, al tamaño del canal y al estado de la atmósfera en la vecindad del buque.

Parece improbable que el direccionamiento del haz de partículas (y su coordinación con los mecanismos de puntería) fuese tan preciso que alcanzase al proyectil al primer disparo. Sería necesario determinar en qué cantidad y en qué dirección el haz de partículas erró el blanco, y tomar las correcciones para llevarlo al objetivo en el siguiente disparo. No está nada claro cómo podría realizarse todo esto, ni tampoco en qué medida sería posible con medios electromagnéticos, puesto que la señal de retorno podría ser interferida, burlada o falsificada por reflexión con otros objetos metálicos contiguos.

Además, el atacante utilizaría varias contramedidas contra un arma de haces de partículas cargadas con base en un buque. Así, un misil crucero subsónico de diseño ordinario pierde sólo el dos por ciento de su velocidad durante el primer kilómetro de su planeo sin impulsión. En estas condiciones, el misil podría lanzar múltiples objetos y todos ellos se dirigirían hacia el objetivo en el último kilómetro, confundiendo a la defensa. Los misiles crucero que ataquen a un buque podrían disparar también un cohete de humo ante sí para dificultar su seguimiento por sistemas ópticos; y podrían disparar virutas metálicas para neutralizar al radar, o pequeños cohetes explosivos para perturbar la uniformidad del aire a su frente.

Considérese finalmente la posibilidad de utilizar un arma de haces de partículas cargadas con base en tierra como mecanismo de destrucción de un sistema ABM de defensa de puntos fuertes. Los objetivos duros, como los silos de proyectiles, son vulnerables a explosiones nucleares en sus proximidades inmediatas; por tanto, un vehículo entrante que ataque a un silo debe penetrar en la atmósfera y explotar cerca del mismo. En principio un arma de haces de partículas que defienda el silo podría aguardar a que la bomba atacante se aproximara a un kilómetro antes de combatirla. Un vehículo entrante moderno tendría una velocidad no inferior a cinco veces la del sonido, y por consiguiente tardaría 0,7 segundos en recorrer el último kilómetro hasta su objetivo, tiempo durante el cual el arma de haces de partículas debería destruirlo o desviarlo de su ruta.

Si los vehículos entrantes fueran del tipo maniobrable, el arma de haces de partículas debería seguirlos y disparar contra ellos a través de la atmósfera llena de cenizas, que podría ser alterada por los primeros disparos del haz o por las explosiones de las bombas nucleares entrantes. No hay pruebas de que un rayo pueda propagarse establemente en tales condiciones. En todo caso, la parte más vulnerable de un arma de haces de partículas cargadas defensora de silos serían los radar de detección, identificación y seguimiento de los vehículos entrantes. Podrían cegarse estos radar, durante períodos prolongados de tiempo, mediante una explosión nuclear en la estratosfera sobre los silos; también podrían ser perjudicados por una detonación nuclear a varios kilómetros de distancia. Todas estas razones de vulnerabilidad son las mismas que se presentaron en los primeros proyectos ABM basados en proyectiles en vez de haces de partículas. La utilización de un haz no alteraría la vulnerabilidad de los radar; por el contrario, le exigiría una precisión varias veces superior, puesto que sería obligatorio impactar directamente al objetivo. Un determinado enemigo podría hacer explotar una bomba nuclear en la perpendicular de los silos para deslumbrar a los radar y perturbar el campo magnético terrestre; podría luego hacer explotar otra bomba suficientemente próxima a los radars para destruirlos y dejar bastantes cenizas en la atmósfera y (ya que a partir de este momento el arma de haces de partículas estaría ciega) proceder a atacar a los silos sin la protección del arma de haces de partículas.

Se puede concluir que las necesidades operacionales para un arma de haces de partículas en cualquiera de las tres aplicaciones consideradas son de proporciones formidables. El direccionamiento del haz con una precisión de una parte sobre 100.000, la estimación del error de puntería del disparo efectuado y la evaluación del daño causado dentro de los estrechos límites de tiempo disponibles resultan operaciones fundamentales y parecen extraordinariamente difíciles, si no imposibles, de conseguir. Las contramedidas, fáciles de llevar a cabo y de coste barato, bastarían para confundir o neutralizar completamente un arma de haces de partículas. Las características de actuación de este sistema no solucionarían la vulnerabilidad y debilidad de los primeros proyectos ABM basados en la utilización de proyectiles como armas de interceptación, ni tampoco aportarían nada al desarrollo de un sustituto eficaz para estos primeros sistemas. Resulta, por tanto, altamente discutible que este sistema pueda funcionar, que sea operacionalmente eficaz en ninguna de las tres aplicaciones que hemos analizado.

Un enzima de la glándula pineal que controla el tiempo

La variación en la actividad del enzima N-acetiltransferasa de la glándula pineal sirve de fundamento para un mecanismo natural que dicta el ritmo vital: una especie de reloj biológico

Sue Binkley

Un sistema biológico capaz de medir el tiempo se puede calificar de reloj biológico. Para que opere del mismo modo que un reloj fabricado por el hombre, el reloj biológico debe estar dotado además de un mecanismo para informar sobre la hora que es (como hacen las agujas de un reloj ordinario) y de un dispositivo para ponerlo en hora si fuese necesario. Por añadidura, los estímulos ambientales no deben influir sobre el mecanismo que controla el tiempo, ni siquiera aquellos que lo ponen en hora. Un mecanismo de relojería que reuniera estos tres tipos de dispositivo podría resultar muy útil para controlar cuándo deben ocurrir las funciones internas del organismo y establecer conexión entre ellas y el ritmo que lleva el mundo exterior. En algunos vertebrados, la glándula pineal, un pequeño órgano englobado en el cerebro, incorpora un sistema de este tipo. Concretamente, se trata del enzima *N*-acetiltransferasa, que cataliza la síntesis de una hormona en la glándula pineal, y que proporciona un mecanismo para el control del tiempo el cual capacita, al parecer, por lo menos a algunos animales, para mantener ritmos de actividad sincronizados con el transcurso del día solar.

Los ritmos diarios de actividad que controla un reloj biológico con período de 24 horas se llaman ritmos circadianos, nombre que proviene de las palabras latinas *circa*, "próximo a", y *dies*, "día". Los ritmos circadianos, cuando cuentan con señales ambientales (como la salida o la puesta del sol) tienen un período exacto de 24 horas, pero si no pueden contar con tales señales, su período es de 24 horas sólo aproximadamente. Muchos sistemas circadianos se ponen en hora utilizando como señal el ciclo diario de iluminación y obscuridad alternantes que origina la rotación de la tierra alrededor de su eje. Los ritmos de esta clase persisten en la obscuridad permanente, mientras que una iluminación intensa y constante los hace desaparecer. En la glándula pineal se han descubierto ritmos de este tipo que afectan la biosíntesis de la hormona melatonina.

Aaron B. Lerner y sus colaboradores de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale fueron los primeros en identificar melatonina en la glándula pineal de res en 1968. La hormona parece ser necesaria al menos para tres funciones de la glándula pineal que guardan relación con ciclos temporales y de iluminación. Son estas funciones: la medida de la duración del día, para controlar el tamaño de los órganos sexuales del hamster, el obscurecimiento nocturno de la piel de algunos vertebrados inferiores y el mantenimiento de los ritmos circadianos normales de actividad locomotriz en gorriones, estorninos y lagartos. A partir del compuesto serotonina se sintetiza melatonina en la glándula pineal. (Se cree que la serotonina es un neurotransmisor, es decir, uno de los compuestos que hacen posible la transmisión del impulso nervioso en las sinapsis del sistema nervioso. También se cree que participa en el control de sueño.) La síntesis transcurre en dos fases. En primer lugar, la serotonina se convierte en *N*-acetilserotonina bajo la acción del enzima *N*-acetiltransferasa; luego, el enzima *N*-acetilserotonina se transforma en melatonina gracias a la acción del enzima hidroxiindol-*O*-metiltransferasa (HIOMT). En investigaciones recientes se ha puesto de manifiesto una pronunciada oscilación circadiana en la actividad de *N*-acetiltransferasa pineal. Debe ser precisamente por mediación de este enzima (y probablemente con intervención de la liberación de la hormona) como la glándula pineal puede funcionar como si fuera un reloj biológico que la luz controla o pone en hora.

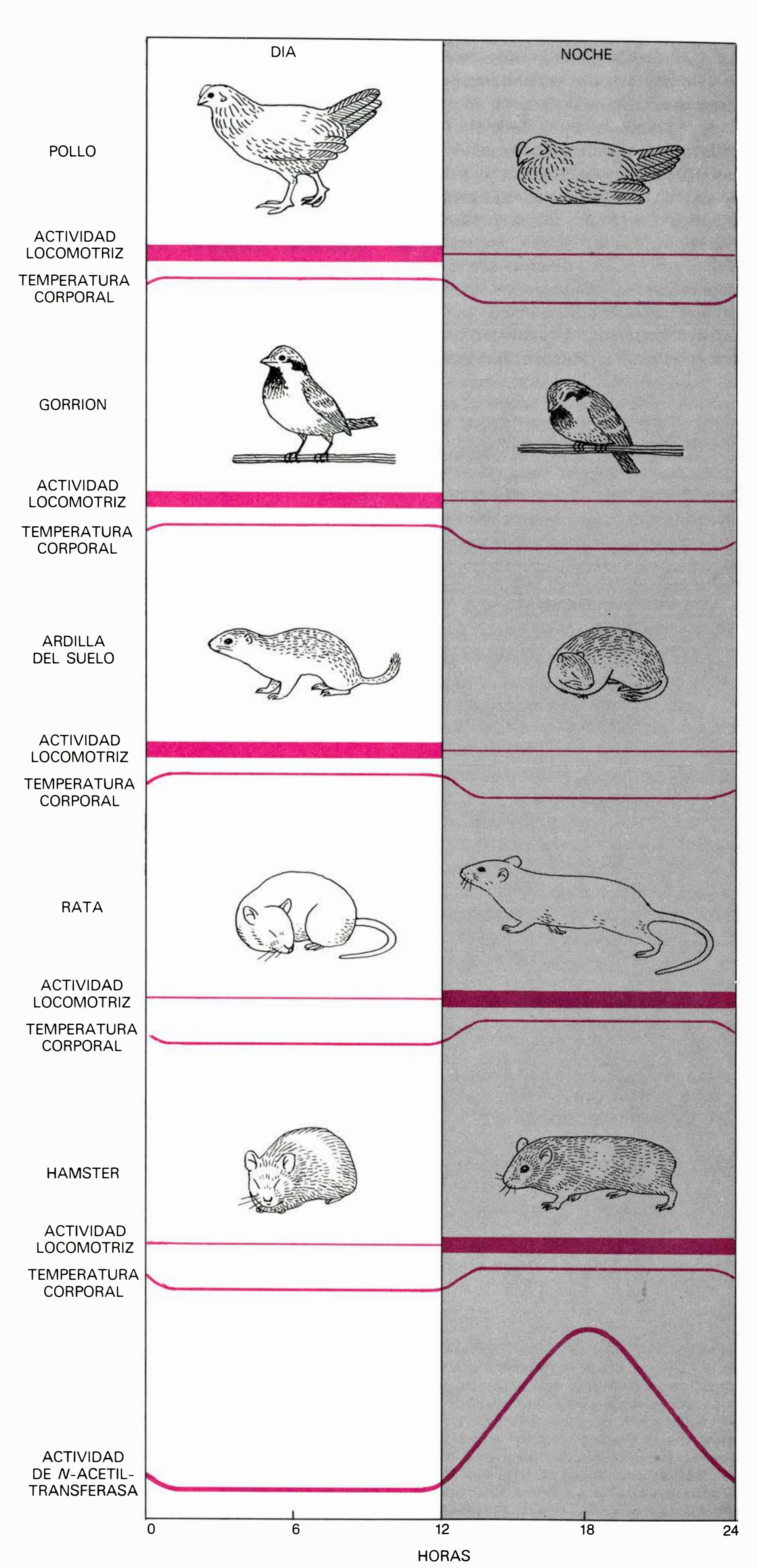
No es nueva la idea de que la actuación de la glándula pineal está asociada de alguna manera con la luz. Hace ya medio siglo que por primera vez se señaló la existencia de estructuras semejantes a las de fotorreceptores en la glándula pineal de varias especies de vertebrado. Bajo el punto de vista anatómico, la glándula también está asociada con el "tercer ojo" que poseen algunos lagartos, anfibios y peces. Fue precisamente esta asociación lo que estimuló la realización de investigaciones encaminadas al establecimiento de una posible conexión entre la luz y la función pineal.

En 1960 Virginia M. Fiske y sus colegas, en Wesley College, descubrieron que las glándulas pineales provenientes de ratas sacrificadas tras un período de iluminación constante pesan un 25 por ciento menos que las de ratas que habían permanecido continuamente en la obscuridad. Más tarde, en 1963 Wilbur B. Quay, de la Universidad de California en Berkeley, descubrió que el contenido en serotonina de la glándula pineal de ratas sometidas a períodos de 12 horas de iluminación y obscuridad alternantes mostraban un alza y un descenso que seguía el ciclo diario: los niveles altos de serotonina se presentaban durante el "día" o período de iluminación, y los niveles bajos de serotonina ocurrían durante la "noche" o período de obscuridad. Quay observó más tarde que, por el contrario, los niveles de melatonina en la glándula pineal son bajos durante el día y altos por la noche.

El desplazamiento rítmico del equilibrio entre serotonina y melatonina en la glándula pineal pareció encontrar su explicación en 1965 cuando Julius Axelrod, Richard J. Wurtman y Solomon H.

Snayder demostraron en el National Institute of Mental Health, que el enzima para la síntesis de melatonina HIOMT de las ratas también responde a la iluminación y la obscuridad. La permanencia constante bajo iluminación durante una semana multiplicó por cinco la actividad del enzima (expresada en términos de melatonina producida por hora por una glándula pineal). Además, cuando se sometió las ratas a ciclos diarios de iluminación y obscuridad, la actividad enzimática alcanzó un máximo en la obscuridad que llegó a ser tres veces superior al valor mínimo observado durante la iluminación. Aparentemente las fluctuaciones diarias en los niveles de serotonina y melatonina podrían deberse a la oscilación diaria en la actividad de HIOMT.

No obstante, en 1970 David Klein y Joan L. Weller, de los National Institutes of Health, demostraron que existe una oscilación mucho más espectacular en la actividad del otro enzima que interviene en la síntesis de la melatonina, *N*-acetiltransferasa. Cuando se sometieron unas ratas a ciclos diarios de iluminación y obscuridad, la actividad de su *N*-acetiltransferasa alcanzó un máximo en la obscuridad, que venía a ser entre 30 y 70 veces mayor que el valor mínimo en el período de iluminación. Esta fluctuación diaria tan amplia debía ser, sin duda, el factor que controlase las fluctuaciones más limitadas en serotonina y melatonina de la glándula pineal; es decir: la actividad de *N*-acetiltransferasa aumentó tanto en la obscuridad que la gran cantidad de melatonina sintetizada ocasionó el agotamiento de las reservas de serotonina. Bajo iluminación, la acti-



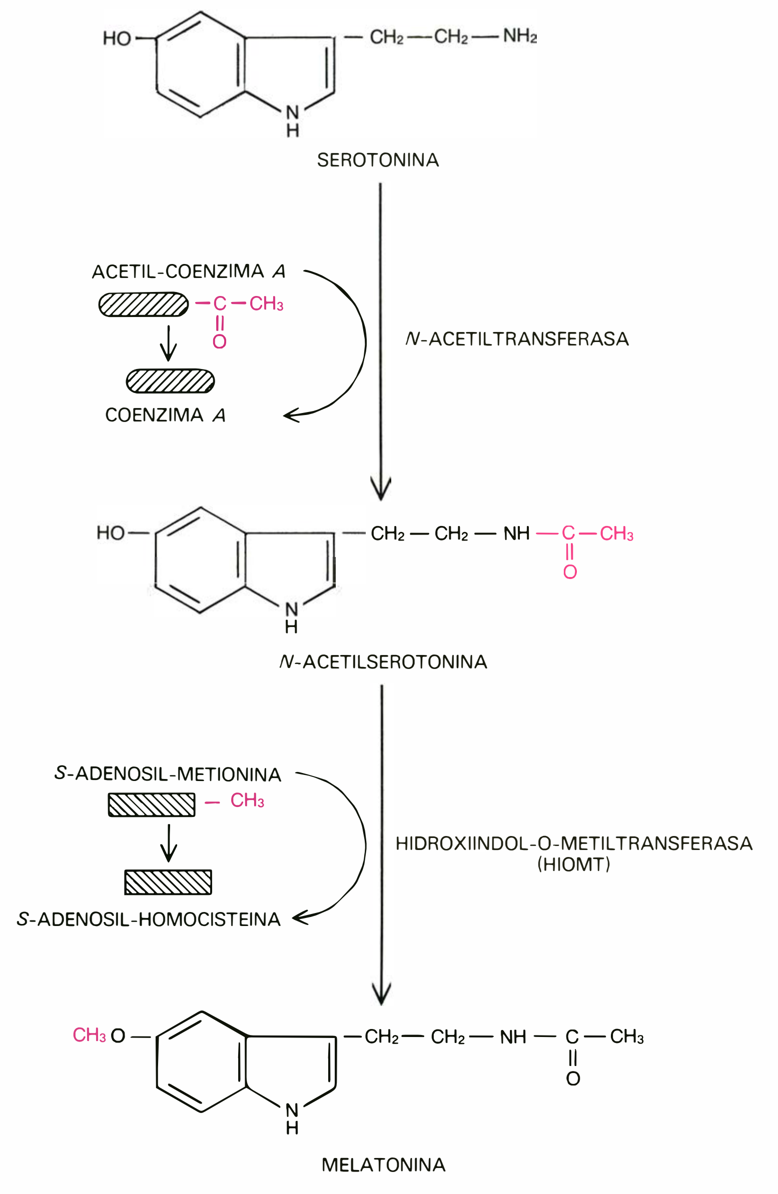
EN MUCHAS ESPECIES de vertebrados ciertos procesos fisiológicos, como es la fluctuación de la temperatura corporal, y determinadas pautas de conducta, como es la fluctuación en la actividad locomotriz, muestran ritmos circadianos que parecen estar controlados por la luz. Cuando se presentan fases alternantes de iluminación y obscuridad, el período de estos ritmos es exactamente de 24 horas, pero en ausencia de tales señales ambientales, el período solamente es de 24 horas de forma aproximada. Tal como se muestra aquí, para la mayoría de los ritmos circadianos el momento en que se alcanza la actividad máxima (en el día o en la noche) depende de si el animal es diurno (está despierto durante el día) o es nocturno (está despierto durante la noche). Constituye una excepción el ritmo circadiano en la actividad del enzima *N*-acetiltransferasa de la glándula pineal que se ha identificado en todas las especies que se señalan: la actividad siempre alcanza su valor máximo por la noche, o en la obscuridad, sin que influya que el animal sea diurno o nocturno. Este hallazgo sugiere que la oscilación diaria de la actividad de *N*-acetiltransferasa de la glándula pineal está estrechamente ligada a un mecanismo interno o endógeno que controla el tiempo en estos animales. En esta ilustración, y bajo forma de diagrama, se han representado las pautas de actividad locomotriz, temperatura corporal y actividad del enzima *N*-acetiltransferasa.

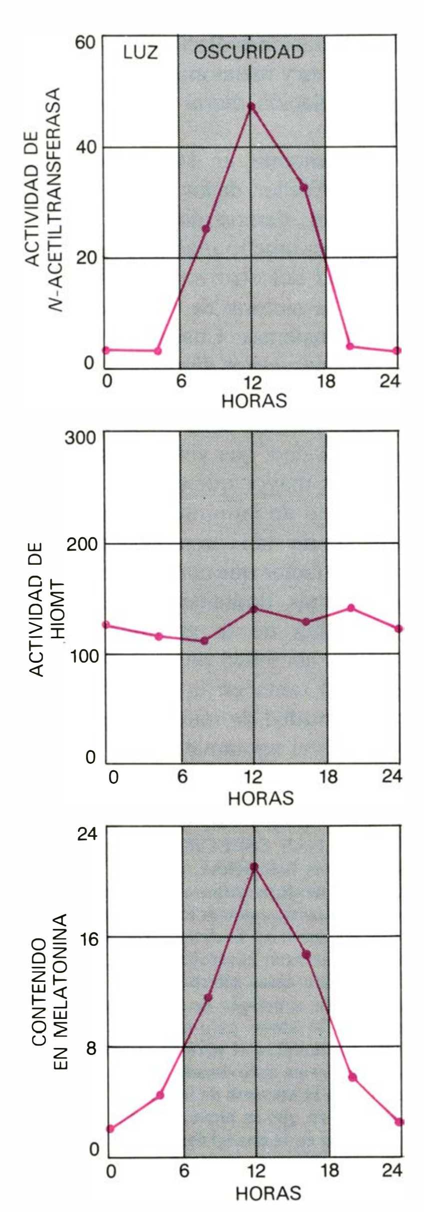
vidad de *N*-acetiltransferasa se redujo de tal forma que se pudo sintetizar poca melatonina y las reservas de serotonina permanecieron prácticamente intactas.

Los descubrimientos de Klein fueron todavía más significativos si atendemos a las pruebas que relacionan la glándula pineal de las aves con su comportamiento. En 1968 Suzanne Gaston y Michael Menaker, de la Universidad de Texas en Austin, probaron que la extirpación de la glándula en gorriones (*Passer domesticus*) elimina el ritmo normal circadiano de actividad locomotriz en el animal. Mientras trabajaba con Menaker como estudiante posgraduado pude comprobar que la pinealectomía no sólo afectaba al ritmo de actividad locomotriz del gorrión, sino también al ritmo de su temperatura corporal.

De una forma más general, pareció muy plausible que el enzima *N*-acetiltransferasa pudiera sincronizar el funcionamiento de las células de todo un organismo completo, bien fuese por agotamiento periódico de las reservas pineales de serotonina, o bien fuese por medio de la liberación periódica de melatonina a partir de la glándula. Se pudo probar que, al inyectar los gorriones con melatonina, se les inducía a perchar (dormir) y descendía su temperatura corporal, siendo ambas manifestaciones características de la fisiología nocturna de estas aves. Lo que es más: la administración continua de melatonina puede cambiar el período normal de estos ritmos y aun eliminarlos por completo en los gorriones.

La conclusión de que la glándula pineal está asociada con un reloj biológico adolecía del defecto de que los estudios bioquímicos y los estudios sobre el comportamiento se habían realizado por separado en dos especies muy



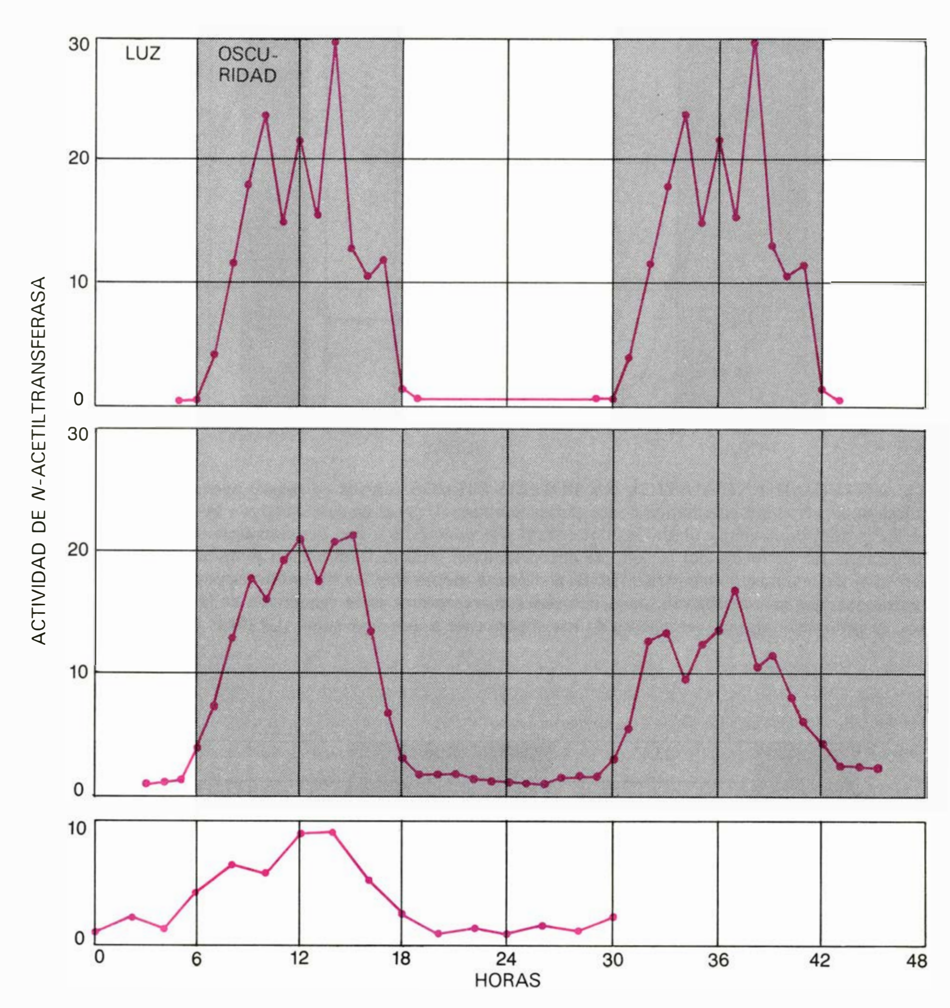


SINTESIS DE LA HORMONA MELATONINA, a la izquierda. Se trata de la vía metabólica de la glándula pineal en que se han identificado ritmos circadianos de actividad enzimática. En este proceso, la sustancia serotonina gana un grupo acetilo para formar *N*-acetilserotonina; luego, *N*-acetilserotonina recibe un grupo metilo para dar origen a melatonina. La primera conversión se produce gracias a la acción de *N*-acetiltransferasa y la segunda a través de la acción del enzima hidroxiindol-*O*-metiltransferasa, o HIOMT. Para investigar el efecto de la iluminación en estas conversiones, se expusieron pollos a períodos alternantes de 12 horas de iluminación y obscuridad y se hicieron determinaciones del contenido en melatonina y de la actividad enzimática en sus glándulas pineales, tal como se indica a la derecha. Este estudio reveló una fluctuación diaria en el contenido de melatonina, que muestra una correlación con la fluctuación diaria de la actividad de *N*-acetiltransferasa. Parece que la oscilación en la actividad de *N*-acetiltransferasa de la glándula pineal de pollo controla la liberación de melatonina; hay pruebas también en torno a la conducta de los animales, que permite inferir que la liberación periódica de melatonina en las aves sincroniza su actividad motriz. Cada uno de los puntos de las gráficas de esta ilustración resulta de promediar los valores obtenidos con seis glándulas pineales; las mediciones del contenido en melatonina y de la actividad enzimática se realizaron en cada una de las glándulas. El contenido en melatonina, que se expresa en nanogramos por glándula pineal, se determinó por medio de un bioensayo basado en el efecto de la melatonina sobre la piel de renacuajos, cuya piel toma una tonalidad más clara. La actividad enzimática, que se expresa en nanomoles de melatonina formada por hora por glándula pineal, se determinó por medio de ensayo radioquímico.

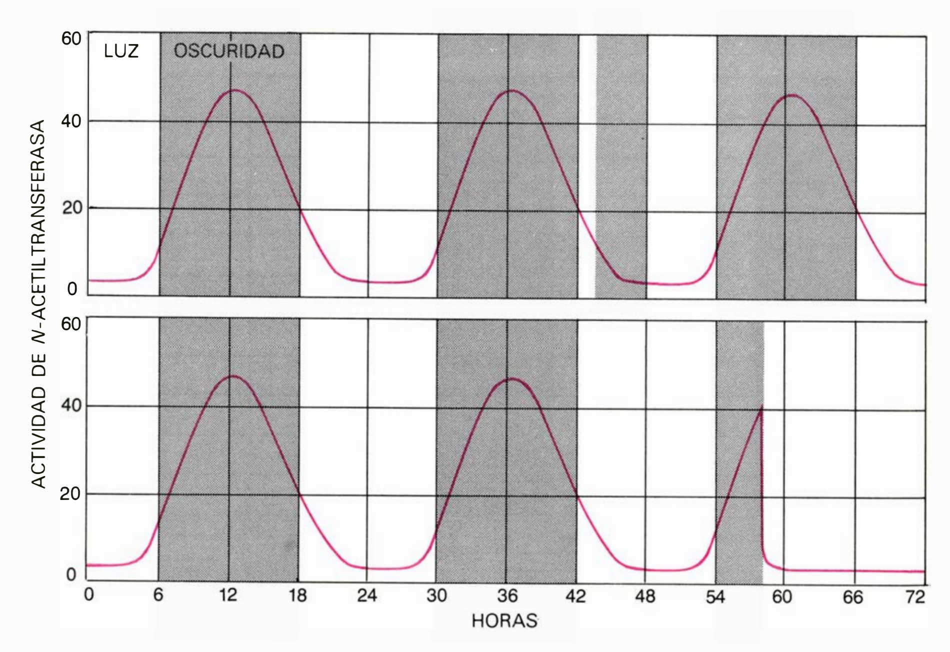
diferentes: rata y gorrión. Por eso, en 1972 me propuse encontrar datos que apoyaran las pruebas sobre la conducta del gorrión examinando con todo detalle los ritmos bioquímicos en la glándula pineal de otra ave: el pollo. Las primeras etapas de este proyecto se llevaron a cabo en colaboración con Charles Ralph y Steven E. MacBride, de la Universidad de Pittsburgh, y mientras disfruté una beca posdoctoral, con Klein en el National Institute of Child Health and Human Development. Decidimos trabajar con pollos (en la mayoría de los casos animales de unas tres semanas de edad) porque son fáciles de obtener en grandes cantidades y, sobre todo, porque estudios previos habían mostrado que su glándula pineal muestra niveles altos de actividad enzimática y gran cantidad de melatonina. Durante los últimos siete años hemos conseguido notables progresos en la comprensión de las características de los ritmos de la glándula pineal de pollo y de la manera como están regulados estos ritmos.

Comenzamos por someter los pollos a períodos de 12 horas de duración de iluminación y obscuridad alternantes y medir la actividad de *N*-acetiltransferasa pineal en diferentes momentos del ciclo. Observamos que la actividad del enzima presentaba un aumento diario de unas 27 veces y que el nivel máximo de actividad se alcanzaba en la obscuridad. Además, la cantidad de melatonina en la glándula pineal, que diariamente aumenta unas 10 veces, alcanzaba su valor máximo prácticamente a la vez que lo hacía la actividad de *N*-acetiltransferasa. Nuestras determinaciones de la actividad de HIOMT revelaron un aumento diario que no sobrepasaba el valor de 1,2 veces. Llegamos así a la conclusión de que es muy probable que, en los pollos, la oscilación en la cantidad de melatonina se deba a la oscilación en la actividad de *N*-acetiltransferasa.

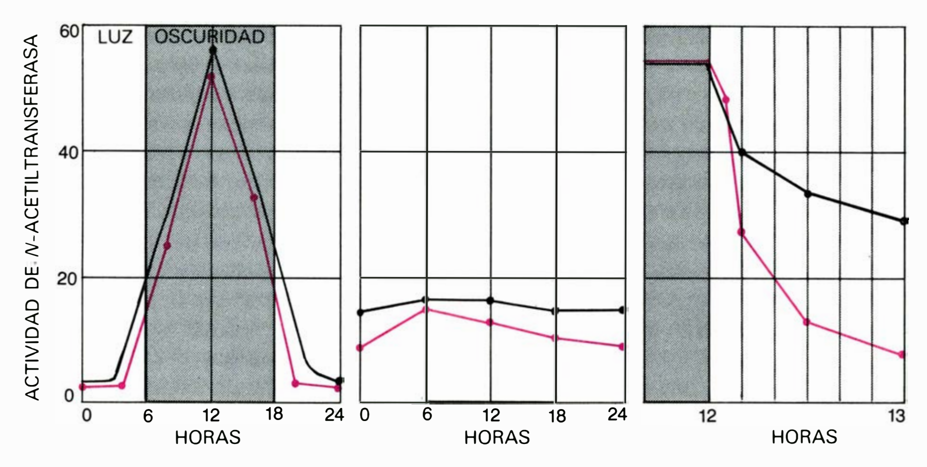
Nos preguntamos si la oscilación de gran amplitud en la actividad de *N*-acetiltransferasa que habíamos descubierto en la glándula pineal de pollo sería un verdadero ritmo circadiano, o simplemente constituiría un conjunto de respuestas a variaciones diarias en la iluminación ambiental. Esta cuestión se podría dilucidar colocando los pollos en una obscuridad permanente y midiendo la actividad de su enzima en distintos momentos del ciclo de iluminación con que habían sido sincronizados. De esta manera se podría determinar si los ritmos establecidos en aquel ciclo persistían todavía. El único inconveniente de este planteamiento es que, en ausencia de señales ambientales, las pequeñas



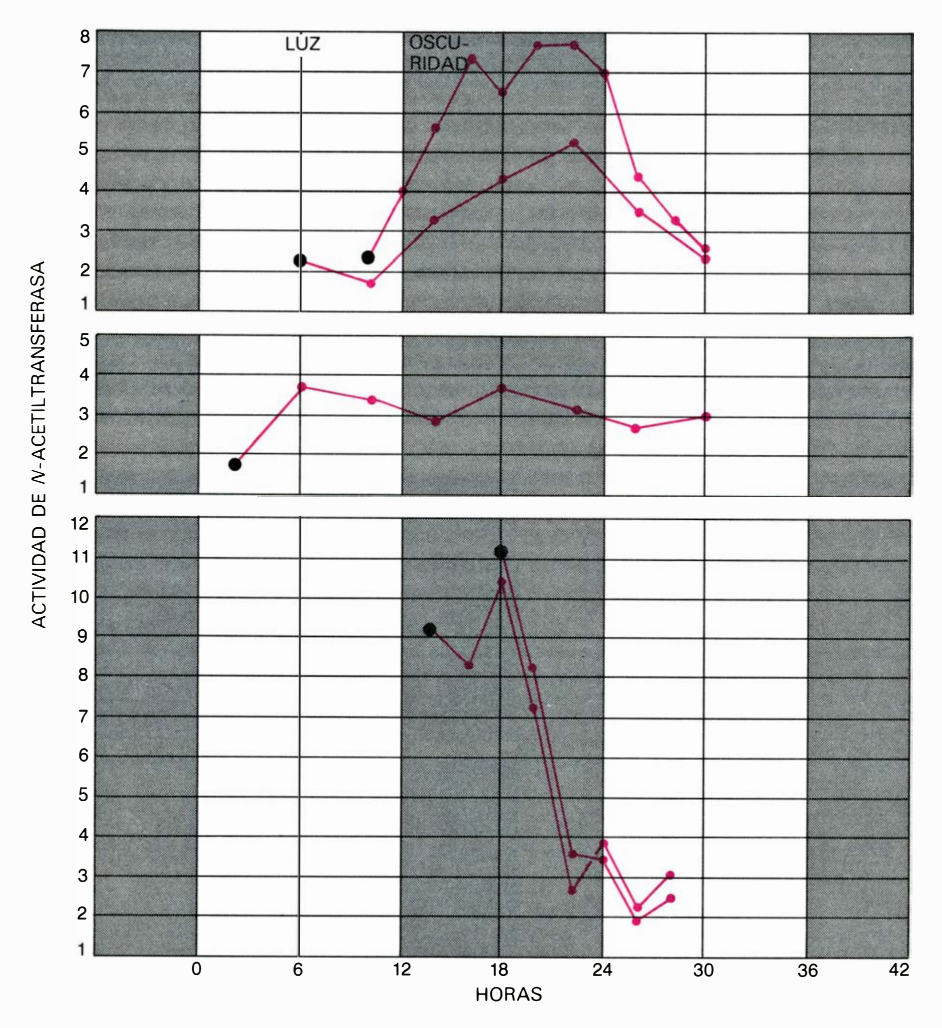
RITMO DE ACTIVIDAD DE *N*-ACETILTRANSFERASA PINEAL, observado en pollos expuestos a períodos de 12 horas de iluminación y obscuridad alternantes (*arriba*); dicho ritmo persiste en pollos sometidos a obscuridad permanente (*centro*) y se suprime en pollos bajo iluminación constante (*abajo*). Estos hallazgos concuerdan con las pruebas sobre ritmos circadianos en la conducta de los animales: dependiendo de su intensidad, la luz puede alterar el valor del período del ritmo y hasta suprimirlo.



CONTROL POR LA LUZ DE LA ACTIVIDAD ENZIMATICA, confirmado al someter a cambios inesperados de iluminación a pollos que antes fueron sincronizados con relación a un ciclo diario de iluminación y obscuridad. Como se muestra aquí de forma diagramática, al exponer los pollos a la obscuridad en la primera parte del período de iluminación (*arriba*) no se produjo aumento en la actividad de *N*-acetiltransferasa de la glándula pineal. Siempre que se inició la iluminación en medio de un período de obscuridad (*abajo*), por el contrario, hubo una rápida disminución en la actividad enzimática. Aunque la luz siempre puede suprimir la actividad de *N*-acetiltransferasa de la glándula pineal, la obscuridad sólo puede iniciar la actividad en ciertos momentos determinados por el reloj endógeno.



LA ACTIVIDAD ENZIMATICA EN POLLOS CIEGOS (*curvas en negro*) apenas si puede distinguirse de la actividad enzimática de los pollos normales (*curvas en color*) cuando las aves se someten a períodos de iluminación y obscuridad alternantes (*izquierda*) o a una luz constante (*centro*). Cuando se enciende la luz en medio del período de obscuridad del ciclo de iluminación y obscuridad (*derecha*), la actividad del enzima *N*-acetiltransferasa disminuye menos deprisa en pollos ciegos; ello sugiere que, aunque los ojos no constituyan los principales fotorreceptores en la regulación de la actividad enzimática, sí interviene alguna percepción de luz conducente a una respuesta. (Gráficas de Bunji Tagawa.)



LA HORA DEL DIA en que se sacrifica el pollo (*puntos negros*) determina el valor de la actividad de *N*-acetiltransferasa de su glándula pineal, cuando se la cultiva en permanente obscuridad. Cuando se sacrifican los pollos en la última parte de un período de iluminación de un ciclo diario de iluminación y obscuridad (*arriba*), la actividad enzimática de sus glándulas pineales en cultivo de órgano subió y bajó en un período de 24 horas. El comienzo del aumento y el final de la caída en la actividad enzimática guardan una relación aproximada con las horas del "amanecer" y el "anochecer". Cuando se sacrifican los pollos en cualquier momento del período de obscuridad (*abajo*), el cultivo de glándula pineal presenta un alto nivel inicial de actividad enzimática, que desciende a la hora del "amanecer" hasta el nivel de un período de poca luz. Todo ello nos permite suponer que la glándula pineal tiene "memoria" de condiciones de iluminación anterior y es capaz de mantener un cronómetro interno. Al sacrificar los pollos de "madrugada" no se observa elevación ni caída de la actividad enzimática en cultivos (*centro*).

variaciones, que siempre existen, entre las duraciones de los períodos que corresponden a los relojes internos de los distintos individuos consigue desfasar rápidamente unos animales respecto de otros y todos respecto del ciclo de iluminación y obscuridad que, en principio, se utilizó para sincronizarlos. En la Universidad de Temple, mi alumno Ellen B. Geller y yo pudimos resolver el problema utilizando pollos que se habían sincronizado con respecto a un ciclo diario de iluminación y obscuridad, colocándolos en un ambiente de permanente obscuridad y haciendo determinaciones de la actividad enzimática de hora en hora. Los experimentos no duraron más de dos o tres días, de manera que los pollos no tuvieron tiempo de desfasarse mucho respecto del ciclo que sirvió para sincronizarlos. Los resultados de estos experimentos pusieron de manifiesto que los ritmos de la actividad de *N*-acetiltransferasa en la glándula pineal de pollo son circadianos: persisten en la obscuridad permanente manteniendo un período con una duración aproximada de 24 horas que se reduce en amplitud al utilizar una iluminación intensa y constante.

La persistencia del ritmo *N*-acetiltransferasa en la obscuridad constante nos indujo a pensar que, aunque generalmente la iluminación suprime la actividad enzimática en el pollo, la obscuridad sólo puede iniciarla en ciertos momentos que fija el reloj endógeno (interno) del ave. Para contrastar si esta conjetura fuese cierta, mantuvimos los pollos durante varios meses en un ciclo diario de iluminación y obscuridad, y los expusimos luego a cambios de iluminación imprevistos. Descubrimos que cuando, en medio de un período de iluminación, se hacía pasar los pollos de forma súbita a la obscuridad, unas 10 horas antes de que llegase el momento en que usualmente se apagaban las luces, no se detectaba un aumento en la actividad de *N*-acetiltransferasa pineal. Por otro lado, cuando se exponían los pollos a la luz de forma súbita en cualquier momento del período de obscuridad, su actividad enzimática se venía abajo con rapidez. En consecuencia, parece que durante la fase de iluminación (o activa) del pollo la glándula pineal es refractaria a la luz en el sentido de que la obscuridad no puede iniciar la actividad enzimática. (Este descubrimiento es muy interesante porque abre el camino hacia una explicación de cómo pueden, tanto los pollos como otros animales, detectar cambios en la duración del día: proceso conocido con el nombre de fotoperiodismo. Cuando un pollo se expone al ciclo natural de día y

noche, el período en que es sensible a la luz, o durante el cual la obscuridad puede iniciar la actividad enzimática y la iluminación puede inhibirla, corresponde aproximadamente al período nocturno. Si un reloj endógeno determina internamente esta sensibilidad, puede que haga el papel de un patrón respecto del cual el pollo pueda medir la duración cambiante de noches sucesivas. De esta manera, un animal podría llevar cuenta del paso de las estaciones y así regular sus actividades conforme a un ciclo anual al mismo tiempo que lo hace respecto del ciclo diario.)

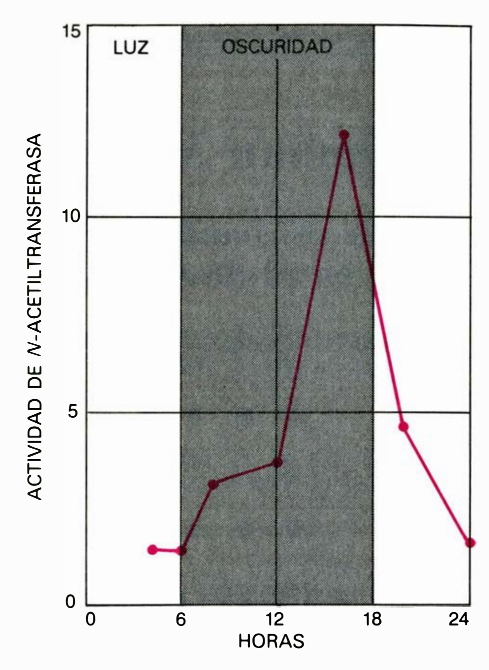
Dirigimos después nuestra atención hacia el tema de cómo se produce en el pollo la regulación del ritmo circadiano de la actividad de *N*-acetiltransferasa de la glándula pineal. En los últimos 20 años se ha registrado un gran progreso en el estudio de la forma de operar de la glándula pineal en la rata. Nuestras propias investigaciones continuadas con pollos muestran que existen diferencias entre los mecanismos de relojería de la rata y el pollo.

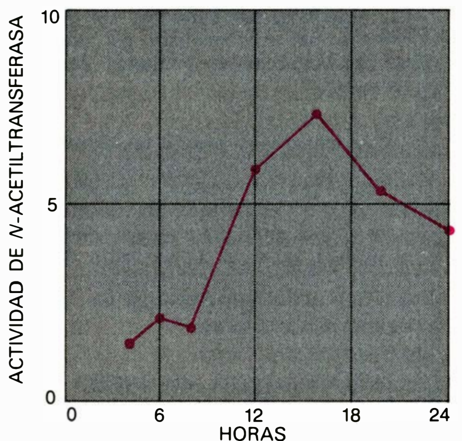
Podemos comenzar por la cuestión de cómo perciben la luz los pollos. Klein descubrió que, en la rata, la percepción de la luz, que regula los ritmos bioquímicos de la glándula pineal, se logra por medio de los ojos, pero hay un cierto número de experimentos que prueban que los cambios que la luz induce en los ritmos circadianos de las aves no están mediados necesariamente por los ojos. Además, en 1968 Jean K. Lauber, de la Universidad de Alberta, descubrió que la iluminación constante suprime la actividad de HIOMT en la glándula pineal de pollos, tanto ciegos como normales. En la misma línea, nosotros hemos encontrado que, en el ciclo diario de iluminación y obscuridad o en iluminación constante, la pauta que sigue la actividad de *N*-acetiltransferasa es la misma en pollos ciegos que en individuos normales. En cambio, cuando determinamos el efecto que produce la iluminación súbita durante el período de obscuridad de un ciclo diario de iluminación y obscuridad, descubrimos que la actividad de *N*-acetiltransferasa de la glándula pineal desciende con menos rapidez en los animales ciegos. Por eso, hemos llegado a la conclusión de que tanto los ojos como otros fotorreceptores no visuales intervienen mediando la respuesta a la luz en la actividad de *N*-acetiltransferasa. También hemos probado que la actividad de este enzima de la glándula pineal de pollo en cultivo de órganos (y por tanto mantenidos fuera del cuerpo del animal) responde a los cambios en las condiciones de iluminación, lo que indica que la propia glándula pineal es capaz de responder a la luz. (Esta respuesta no visual a la luz ocurre quizás a través de estructuras que se observan en la glándula pineal de las aves, que se asemejan a fotorreceptores.)

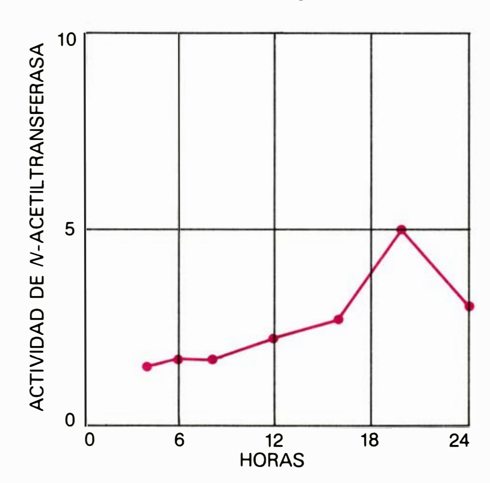
Una vez que se percibe la luz, ¿cómo puede regular la actividad enzimática de la glándula pineal? Ciertos experimentos realizados por Wurtman y Klein, Weller y Robert Y. Moore han establecido que, en la rata, la información sobre la luz se transmite desde los fotorreceptores del ojo hasta la glándula pineal, siguiendo una vía neural que comprende el ganglio cervical superior. No obstante, Lauber ha probado que la extirpación del ganglio cervical superior en el pollo no influye sobre la respuesta de la actividad de HIOMT a la iluminación constante y nosotros hemos obtenido resultados análogos con la actividad de *N*-acetiltransferasa en ciclos diarios de iluminación y obscuridad. Por tanto, parece que el mecanismo neural de la regulación enzimática, lo mismo que la sede de la fotorrecepción, difiere en rata y pollo. Estos hechos me llevaron a sospechar que quizá también los procesos bioquímicos pudieran ser diferentes.

En la rata, la glándula pineal está ligada al ganglio cervical superior por fibras nerviosas que liberan el neurotransmisor noradrenalina. La noradrenalina (y una gran variedad de sustancias similares que se califican de adrenérgicas) actúan estimulando la producción de adenosina 3'5' monofosfato, o AMP cíclico, que, a su vez, actúa como un "segundo mensajero" para iniciar la actividad del enzima *N*-acetiltransferasa en la glándula pineal de rata. En mi laboratorio inyectamos en pollos una gran variedad de compuestos adrenérgicos en la fase de iluminación o en la de obscuridad del ciclo diario, para ver si los compuestos presentaban los mismos efectos que ejercían sobre ratas. También determinamos la actividad de *N*-acetiltransferasa en cultivos de órganos de glándula pineal de pollo que se había tratado con los mismos compuestos. Los resultados de estos experimentos muestran que un cierto número de compuestos (entre los que se cuentan la noradrenalina y otra sustancia adrenérgica, isoproterenol) que estimulan la actividad del enzima en la rata, presentan el efecto contrario en los pollos: inhiben la actividad. Por tanto, quizá la noradrenalina no intervenga en pollos iniciando la actividad de *N*-acetiltransferasa sino inhibiéndola para cortar así el funcionamiento de la glándula pineal.

Entonces, ¿qué es lo que pone en marcha la actividad de *N*-acetiltransferasa en la glándula pineal de pollo? Al







PRUEBAS de percepción luminosa en la glándula pineal a partir de cultivos de glándulas bajo distintas condiciones de iluminación. Para los experimentos que se ilustran aquí, se extrajeron glándulas pineales de pollos sacrificados en la segunda parte del período de iluminación de un ciclo diario de iluminación y obscuridad, de manera que cupiese esperar un alza y un descenso en la actividad enzimática a lo largo de un período de 24 horas. En glándulas pineales cultivadas siguiendo el mismo ciclo diario (*arriba*), la actividad enzimática se incrementó más y descendió más deprisa que en glándulas cultivadas en permanente obscuridad (*centro*). La exposición a iluminación constante (*abajo*) redujo el valor máximo de la actividad enzimática y retrasó su aparición.

ensayar la actividad de una gran variedad de compuestos sobre la actividad de *N*-acetiltransferasa de glándula pineal en cultivo de órgano, no hemos hallado hasta ahora ninguno cuyo efecto se aproxime siquiera a la multiplicación de la actividad por 27 que se observa en los pollos vivos expuestos al ciclo diario de iluminación y obscuridad. Este resultado parece indicar que la iniciación de la actividad enzimática pineal en pollo no requiere, tal vez, un estímulo neural, y que el mecanismo de iniciación pudiera ser intrínseco respecto de la glándula pineal. Sin embargo, ninguno de los experimentos que hicimos para corroborar esta hipótesis dio resultados convincentes, hasta que logramos un descubrimiento importante: la actividad enzimática de la glándula pineal en cultivo de órgano depende de la hora del día en que se sacrifique el pollo de que procede la glándula.

Descubrimos que cuando un pollo sincronizado para un ciclo diario de iluminación y obscuridad se sacrifica precisamente hacia el final de un período de iluminación y su glándula pineal se cultiva en obscuridad permanente, la actividad de *N*-acetiltransferasa en el cultivo crece y disminuye después [*véase la ilustración inferior de la página 24*]. Sacamos de ello la conclusión de que la glándula pineal puede iniciar la actividad de forma intrínseca. Además, el comienzo del aumento y el final de la caída en la actividad de *N*-acetiltransferasa guardan una relación aproximada con las horas del "anochecer" y "amanecer" en el ciclo antes establecido de iluminación y obscuridad, lo cual implica que la glándula pineal tiene también una capacidad intrínseca para medir el tiempo. Cuando el pollo se sacrifica en cualquier momento del período de obscuridad, el cultivo de glándula pineal correspondiente presenta un alto nivel inicial de actividad enzimática, que desciende a la hora del "amanecer" hasta el nivel de un período de poca luz. Resulta así que la glándula pineal parece tener una "memoria" de las condiciones de iluminación a las que el pollo se vio expuesto.

Opinamos que el reloj de la glándula pineal posee un mecanismo de puesta en hora que incluye la percepción de la luz y esta memoria del tiempo. Con mayor precisión, parece como si el reloj biológico pudiera ser puesto en hora sólo en el período en que el sistema no es refractario a la luz (cuando la actividad de *N*-acetiltransferasa se puede inhibir), y que el período refractario pudiera venir impuesto por la memoria de un ciclo previo de iluminación y obscuridad. No se observa elevación ni caída de la actividad enzimática en cultivos de glándula pineal de pollos sacrificados en la primera parte del período de iluminación, de modo que sospechamos que "por la mañana" temprano falta algún factor de la glándula pineal que permite desencadenar la actividad de *N*-acetiltransferasa (o quizá lo que ocurre es que se halla presente un factor que impide la iniciación de la actividad). Este factor desconocido quizá se sintetice en la misma glándula o a lo mejor se origina en otra parte, por ejemplo en la sangre o en las terminaciones nerviosas.

La glándula pineal aparece estrechamente asociada con un reloj biológico en muchas especies de animales vertebrados. Puesto que algunos animales que carecen del órgano muestran ciclos circadianos de actividad a pesar de todo, es evidente que la glándula pineal no es el único reloj biológico, sino sólo uno entre muchos. De hecho, la oscilación persistente que he descrito para la actividad de *N*-acetiltransferasa en la glándula pineal de rata adulta parece que se origina en otra parte: en el núcleo supraquiasmático del hipotálamo. Este hallazgo no es tan perturbador como pudiera parecer a primera vista. En mi opinión, el mecanismo que tienen los vertebrados para generar ritmos circadianos es como una jerarquía de estructuras capaces de sostener oscilaciones. Estas estructuras están organizadas de modo que una de ellas actúa de marcapasos, manteniendo sincronizadas todas las demás. Sin duda, estudios futuros revelarán cómo se disponen dichas estructuras de acuerdo con su categoría respectiva y cómo interactúan. Sospecho que estas interacciones deben variar de unas especies a otras, dependiendo de las variadas maneras en que las distintas especies se han adaptado a su ambiente.

La glándula pineal es, pues, algo más que una estructura capaz de controlar el tiempo. A través de la liberación de melatonina, este reloj biológico puede proporcionar información sobre la hora, y, aunque el mecanismo de control del tiempo se puede volver a poner en hora con facilidad siguiendo señales luminosas (directamente o por medio de señales nerviosas), no hay pruebas que indiquen que los estímulos ambientales le fuercen a adelantar o retrasar. Todas las funciones de la glándula pineal que se han estudiado hasta ahora parecen hallarse implicadas de alguna manera en ciclos temporales o de iluminación y obscuridad. No debe faltar mucho para que se disponga de una comprensión cabal de cómo actúa exactamente la glándula pineal y sus hormonas en el papel de reloj biológico bajo control de la luz para llevar a cabo estas funciones.

Evolución de las galaxias de disco

Una galaxia espiral puede transformarse en un disco liso sin brazos espirales. El que lo haga o no depende de sus alrededores: la galaxia que tiene mayor probabilidad de transformarse en disco liso es la perteneciente a un cúmulo rico

Stephen E. Strom y Karen M. Strom

Desde que se llegó a la conclusión de que las galaxias eran universos aislados exteriores a nuestra propia galaxia de la Vía Láctea, las galaxias se han utilizado como sondas de la estructura en gran escala y de la histoia de la evolución del universo. Su utilidad para este propósito depende en forma crítica de nuestro conocimiento sobre cuándo se formaron las galaxias y sobre cómo han cambiado con el tiempo sus propiedades globales (tamaño, luminosidad y color) y su estructura detallada. El desarrollo de modelos plausibles de la formación y evolución de las galaxias ha planteado por tanto a los astrónomos un desafío estimulante. La elaboración de tales modelos es particularmente difícil, porque la mayor parte de las galaxias nacieron, evidentemente, hace quince mil millones de años y la fase más rápida de su evolución tuvo lugar mucho tiempo antes de la presente época. De aquí que no haya "instantáneas" de galaxias próximas en diversas fases de su evolución

¿Cómo se puede entonces constituir la base observacional para dar forma y someter a prueba los modelos de la formación y evolución de las galaxias? En primer lugar, los modelos se pueden someter a prueba en relación con las características observables de las galaxias próximas y altamente evolucionadas que son más susceptibles de estudio detallado. En segundo lugar, se puede mirar hacia atrás en el tiempo observando galaxias situadas a distancias de varios miles de millones de años-luz y comparando sus propiedades con aquellas que son características de los sistemas próximos. En tercer lugar, se pueden buscar aquellas galaxias próximas que son jóvenes o que parecen haber evolucionado más lentamente que los sistemas típicos.

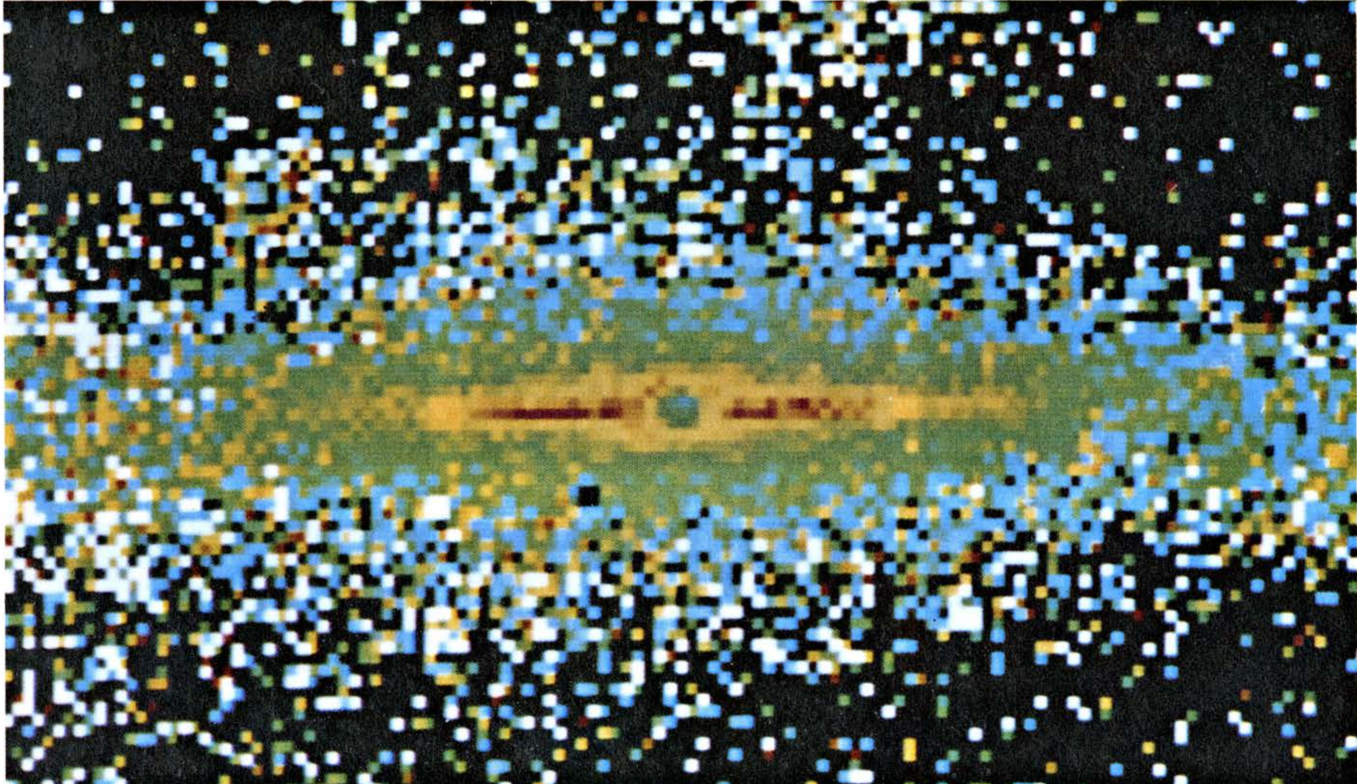
Estudios recientes de galaxias de disco ilustran la utilidad de todos esos enfoques. Una galaxia de disco tiene dos partes morfológicamente diferenciadas: un núcleo central, que consta de un conglomerado esferoidal de estrellas, y un disco circundante, formado de estrellas que se extienden hacia la periferia en una capa delgada. Los tamaños relativos del núcleo y el disco varían desde un núcleo casi puro en algunas galaxias hasta un disco casi puro en otras. La región del núcleo de la mayor parte de las galaxias de disco parece estar totalmente desprovista de estrellas jóvenes. La región del disco, sin embargo, varía considerablemente en cuanto a su actividad de formación de estrellas. En galaxias de disco del tipo espiral, las estrellas recién formadas y sus complejos asociados de gas hidrógeno ionizado definen los brazos espirales que aparecen espectacularmente en las fotografías. En las galaxias de disco del tipo SO, por otra parte, los discos son lisos y desprovistos de complejos estelares jóvenes. Además, los discos de las galaxias SO no ofrecen pruebas de tener el gas requerido para alimentar la formación de estrellas en el futuro.

Las galaxias espirales parecen habitar en un medio que es marcadamente diferente del de las galaxias SO. Mientras que las espirales constituyen la clase dominante de sistemas en regiones en que las galaxias son escasas y ampliamente espaciadas, son raras en las regiones centrales de los grandes cúmulos de galaxias densamente poblados, los cuales pueden constar desde unos centenares hasta más de mil sistemas galácticos individuales en un volumen de espacio cuyo diámetro varía desde un millón a diez millones de años luz. Las galaxias SO, por el contrario, son con mucho el tipo más corriente de sistemas en disco en los grandes cúmulos, y abundan menos que las espirales en las regiones de menor densidad galáctica.

Los estudios actuales sobre la evolución galáctica están dirigidos a aislar los factores genéticos y ambientales que controlan el aspecto de las galaxias en función del tiempo. ¿Cómo se explica la prominencia relativa de las componentes núcleo y disco? ¿Por qué continúan formándose estrellas en las galaxias espirales pero no en las SO? ¿Cómo se explica la diferencia en la distribución de frecuencia de espirales y SO en regiones con diferentes densidades de galaxias? Presentaremos hechos que sugieren que las respuestas a esas preguntas se encuentran primariamente en las condiciones del medio que predominan durante la formación de una galaxia.

Las galaxias de disco probablemente comienzan su vida en la primitiva historia del universo en expansión en la forma de nubes protogalácticas y toscamente esféricas que principalmente constan de agrupamientos de gases hidrógeno y helio. Cuando la autogravitación de la nube sobrepasa el efecto opuesto de la expansión del universo, la nube comienza a contraerse. La contracción se efectúa con la máxima rapidez en la región central de la nube y, más despacio, en las regiones periféricas. Cuando la región central alcanza una cierta densidad, comienzan a formarse estrellas, consumiendo gran parte del gas disponible. El resultado es un sistema esferoidal con un diámetro de entre 10.000 y 100.000 años luz que contiene entre 10^{18} y 10^{12} estrellas, sistema que exteriormente es semejante a las galaxias que se denominan elípticas.

El gas de baja densidad que queda en las regiones periféricas en contracción lenta es tan difuso que resulta imposible la formación de estrellas en esas regiones. Gran parte del gas queda en forma de bolsas. Cuando dos de ellas chocan, se calientan; su energía cinética se convierte así en radiación que escapa de la galaxia. Las bolsas chocan principalmente a lo largo del eje de rotación de la nube protogaláctica. Con el tiempo, la energía de los movimientos de las bolsas paralelos al eje de rotación se disipa en choques, con el resultado de que el gas finalmente se aplasta en forma de disco

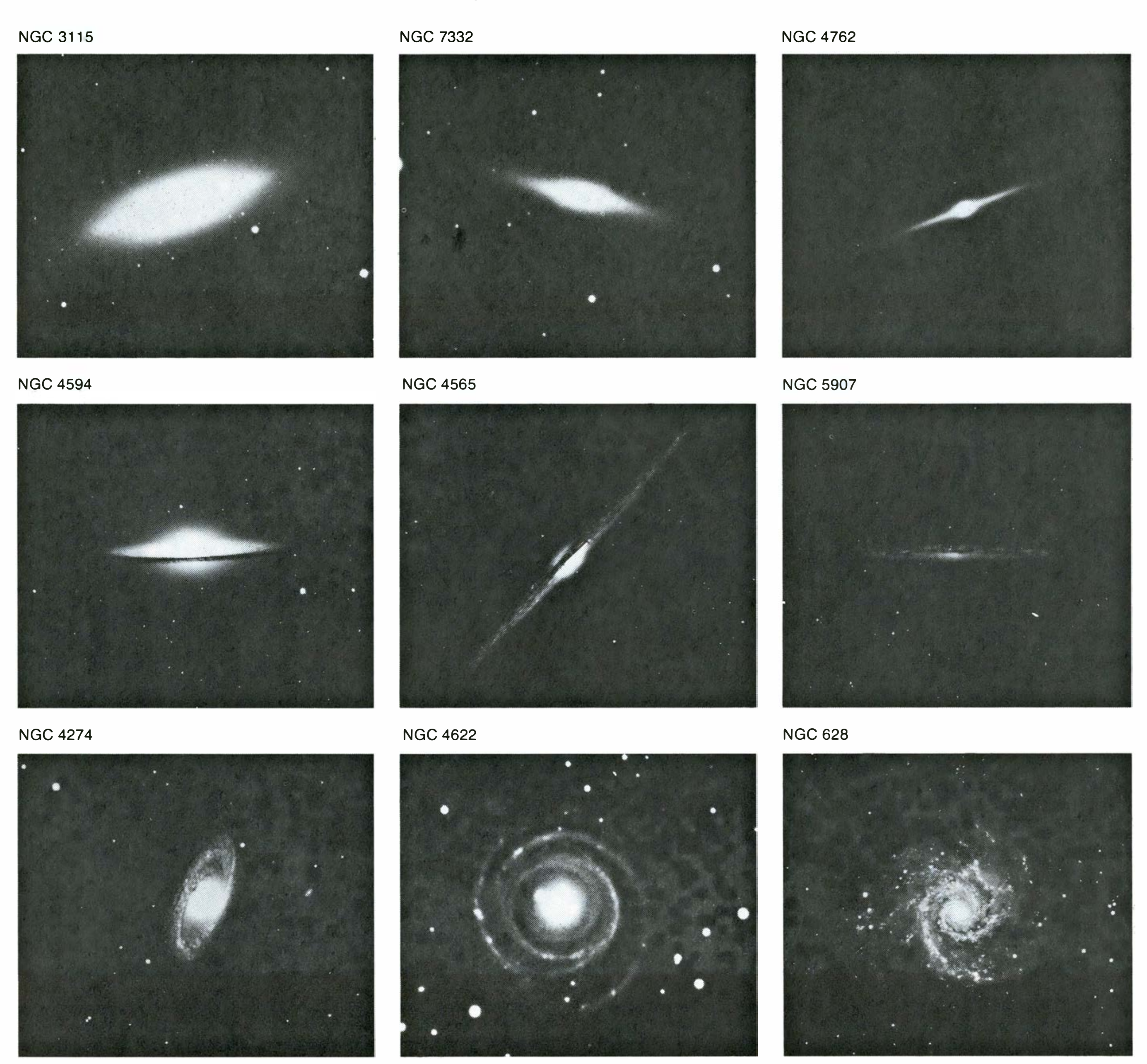


GALAXIA ESPIRAL NGC 4762, que es la más plana de las conocidas. Aquí aparece representada en dos imágenes codificadas en color creadas por los autores con la ayuda del sistema interactivo de procesado de imágenes (IPPS) desarrollado recientemente en el Observatorio Nacional de Kitt Peak. Para comparación, en la parte superior derecha del grupo de nueve galaxias ilustrado en la página siguiente aparece una fotografía corriente de NGC 4762, que se encuentra a la distancia de 60 millones de años-luz. Bajo el control de un ordenador, el IPPS presenta una fotografía digitalizada en la pantalla. Introduciendo por teclado instrucciones sencillas, el astrónomo puede fácilmente observar el efecto de la alteración de los niveles de brillo o la elección del esquema de colores de la clave para poner de manifiesto características de interés. En la fotografía de arriba, la fotografía original de NGC 4762 se ha manipulado de manera que las áreas más azules corresponden a las regiones más débilmente luminosas de la galaxia. La representación de abajo se ha sintetizado a partir de dos fotografías de la misma galaxia, una hecha en el ultravioleta y la otra en el rojo. Las regiones galácticas con relación ultravioleta a rojo más alta se han codificado en azul. Puede verse que corresponden a las regiones débiles (codificadas en azul) en la representación de más arriba. Los autores creen que las regiones azules están dominadas por estrellas antiguas que sólo contienen pequeñas cantidades de elementos más pesados que el helio. En contraste, las regiones codificadas en color rojo se cree son ricas en elementos más pesados.

giratorio. Cuando la densidad del gas alcanza un valor crítico, empiezan a formarse las estrellas. Los tamaños relativos del disco y el núcleo dependen de la eficacia del proceso generador de estrellas en la fase primitiva del colapso o contracción de la nube protogaláctica. Si inicialmente se convierte en estrellas una proporción considerable de la nube, la cantidad de gas que queda para formar el disco será pequeña. El sistema por tanto tendrá un núcleo grande y un disco pequeño.

Las inestabilidades en el disco estelar recién formado dan lugar a la creación de una distribución ondulada y en espiral de las estrellas de disco. El registro en función del tiempo de la densidad de distribución de estrellas en la superficie del disco mostraría ondas de densidad cuyas crestas parecerían moverse en el seno del disco a una velocidad angular llamada velocidad de la distribución y designada por Ω_p (omega mayúscula con el subíndice *p*, donde *p* corresponde al inglés *pattern*). El gas del disco a una distancia dada *r* del centro de la galaxia se mueve en órbita alrededor del centro a una velocidad angular $\Omega(r)$, que generalmente es superior a Ω_p. Frank H.-S. Shu y William W. Roberts, Jr., de la Universidad de Virginia, y sus colaboradores, pusieron de manifiesto que a medida que el gas se mueve a través de las ondas de densidad, se puede producir una onda de choque si tanto la magnitud $\Omega(r) - \Omega_p$ como la amplitud de la onda son suficientemente grandes. Se cree que las condiciones en la región comprimida detrás de la onda de choque son propicias para forzar el colapso y la fragmentación del gas, produciendo por tanto cúmulos de estrellas. Las estrellas luminosas y calientes pero de vida corta existentes en los recién formados cúmulos definen los brillantes brazos que son la característica más prominente en las fotografías de galaxias espirales.

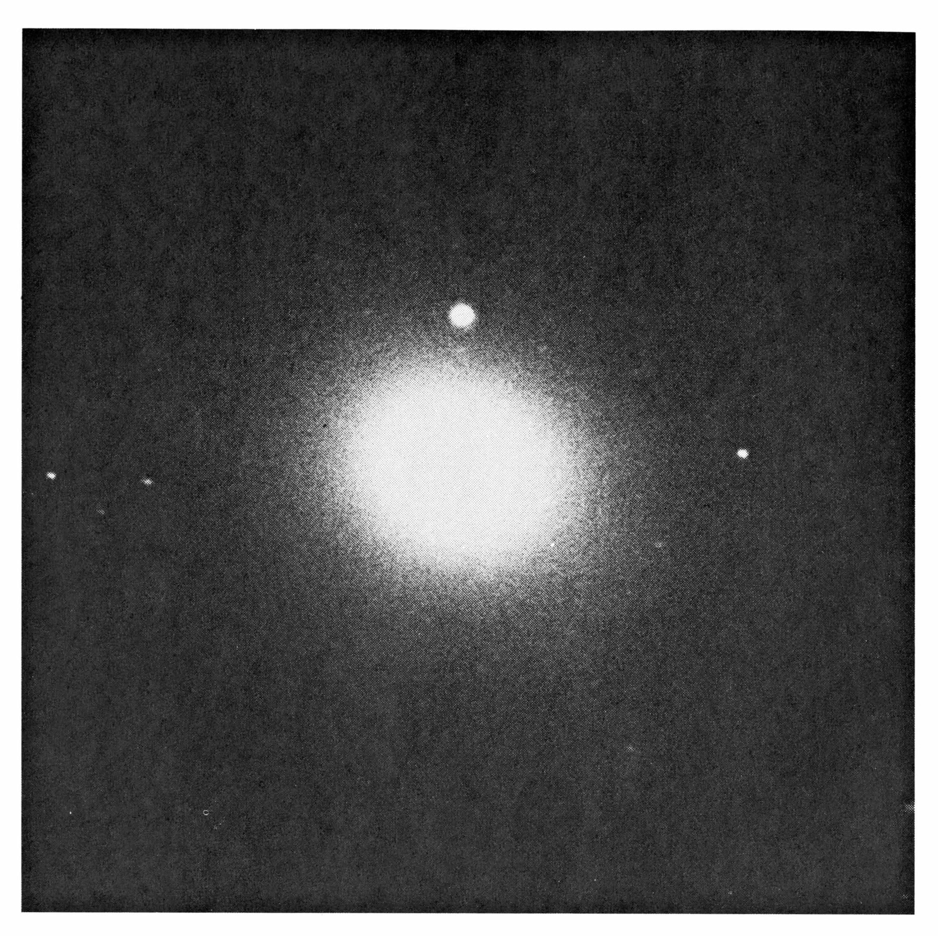
La velocidad a la cual los sucesos que conducen a la formación de estrellas son inducidos por las ondas de choque.



GALAXIAS DE DISCO, que se pueden dividir en dos grandes categorías: sistemas espirales y sistemas SO. Ambas clases de galaxias tienen un núcleo central y un disco que lo rodea. Los discos de las galaxias espirales tienen brazos visualmente prominentes, porque están salpicados de complejos de estrellas brillantes recientemente formadas. Los discos de las galaxias SO, por el contrario, son lisos, no muestran estructura espiral y están desprovistos de estrellas jóvenes. Las tres fotografías de la fila superior presentan sistemas SO vistos casi de frente, colocados en orden de prominencia decreciente de su núcleo respecto a su disco. No hay pruebas visibles de formación reciente de estrellas. Las fotografías de la fila central muestran tres galaxias del tipo espiral, de frente y en orden de relación núcleo a disco decreciente. Las galaxias de la fila inferior ilustran la posible apariencia de las galaxias de la fila central cuando se ven de cara. Los nudos brillantes en los brazos espirales son complejos estelares neoformados.

depende de la frecuencia con que el gas encuentra las crestas de las ondas de densidad. La frecuencia es aproximadamente igual a 1 dividido por $\Omega - \Omega_p$ y generalmente es máxima hacia la región interna de la galaxia y decrece hacia fuera. De aquí que la velocidad de formación de estrellas y el consiguiente empobrecimiento en gas son máximos en las regiones internas. A medida que la galaxia evoluciona, el gas se agota a causa de la formación de estrellas, primero en las regiones centrales, y después en una fracción creciente del disco. El agotamiento del gas debe ser más rápido en sistemas con un núcleo prominente, gran velocidad de rotación del núcleo respecto al disco y alto valor de $\Omega - \Omega_p$.

El combustible para la formación de más estrellas sólo puede ser proporcionado por la lenta expulsión de gas por parte de estrellas agonizantes en el disco, la atracción de gas residual en la formación de la galaxia o la captación de gas exterior a la galaxia. Sandra M. Faber, de la Universidad de California en Santa Cruz, y John H. Gallagher, de la Universidad de Illinois, han sugerido, sin embargo, que tales fuentes de reabastecimiento pueden ser anuladas por los efectos de un viento de gas de alta velocidad procedente de la región esferoidal en el núcleo. La energía del viento procedería de dos fuentes: el calor generado por explosiones del tipo supernova y el generado por choques entre las capas esféricas de gas expulsadas por estrellas agonizantes. Si el calentamiento es suficientemente intenso para superar el enfriamiento radiativo (energía que escapa en forma de fotones, o cuantos de radiación electromagnética), la temperatura de equilibrio del gas en el núcleo será tan alta que el gas ya no quedará ligado gravitatoriamente al núcleo. En general, los núcleos masivos producirán los vientos más fuertes. Si la presión del viento saliente es suficientemente grande, llegará a desproveer de gas el disco circundante.

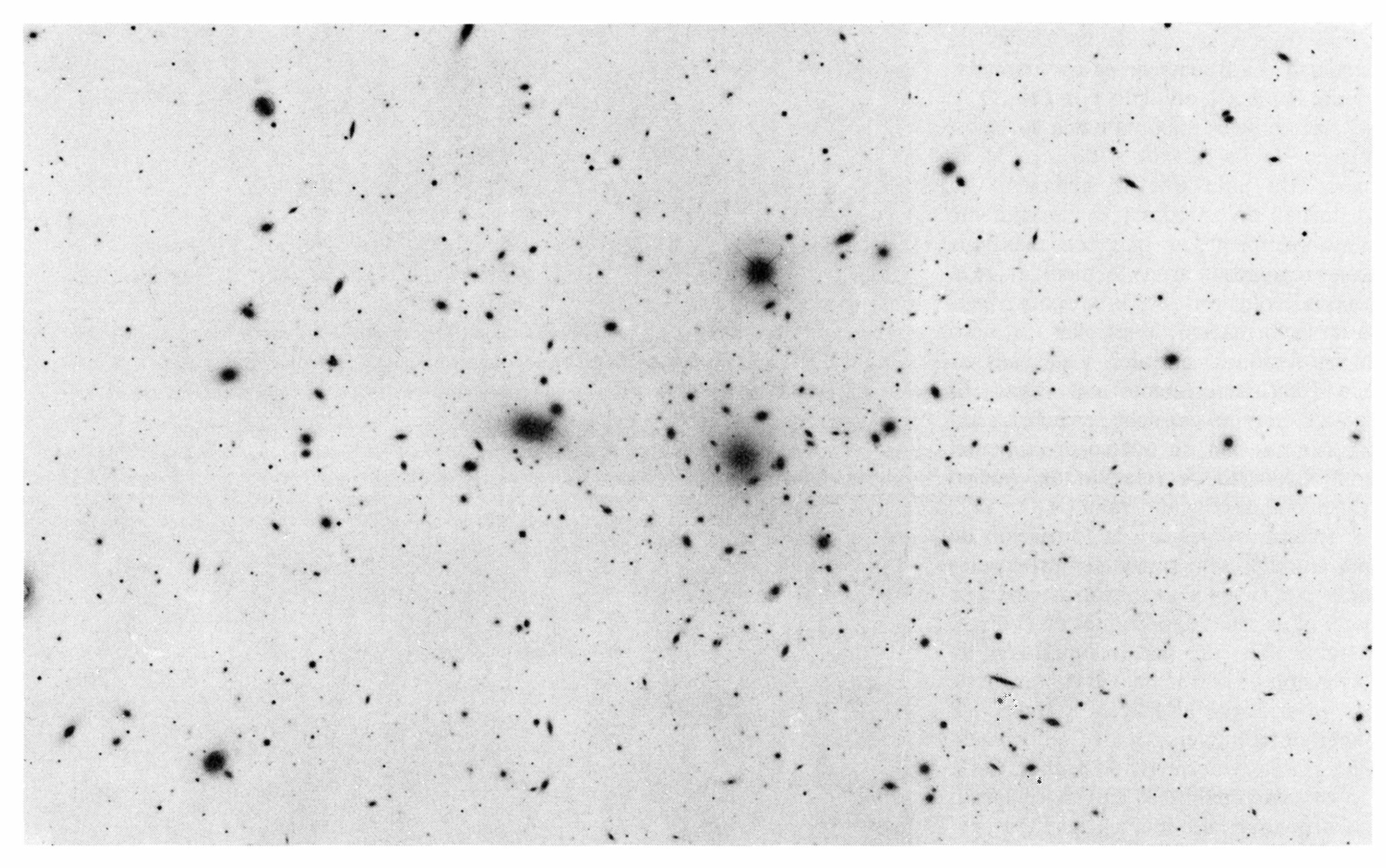


GALAXIA ELIPTICA GIGANTE NGC 4472, representativa de sistemas que no tienen disco. Se supone que dicha galaxia tiene forma esferoidal. Como en las galaxias SO, en ella faltan estrellas jóvenes. Tales galaxias tienen una masa de unas 10^{12} veces la masa del Sol, lo que las hace de masa 5-10 veces mayor que la de nuestra galaxia espiral. NGC 4472 está a 60 millones de años-luz.

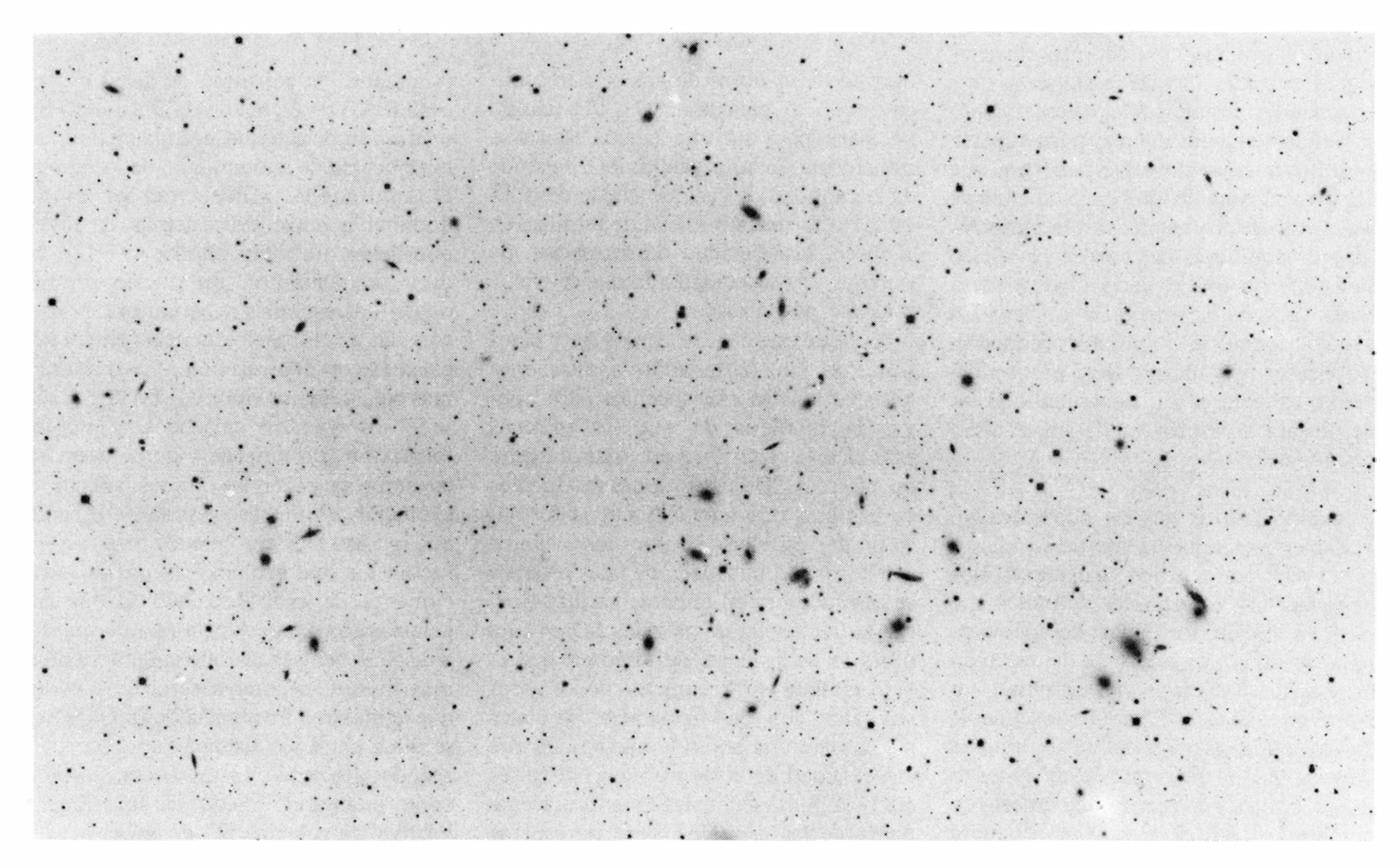
Cuando todo el gas ha sido extraído, bien por la formación de estrellas o bien por los vientos galácticos, los brillantes brazos espirales definidos por estrellas recién formadas desaparecen. La distribución en ondas de densidad en las estrellas del disco más antiguas, sin embargo, subsiste. El sino subsiguiente de una onda de densidad en un sistema libre de gas no se explica bien. Nuestra mejor hipótesis es que la onda crecerá en amplitud al principio y se amortiguará después en el curso de unas pocas rotaciones galácticas, digamos entre quinientos y mil millones de años. Si nuestra suposición es correcta, los sistemas de disco libres de gas se parecerán entonces a galaxias SO. El tiempo necesario para que una galaxia espiral se transforme en una galaxia SO depende de la cantidad de gas que queda después disco, la formación inicial de estrellas en el disco, la velocidad de formación de estrellas y la velocidad a la que se añade o extrae gas al disco.

Aunque este cuadro parece muy plausible, no hay hasta ahora indicaciones observacionales convincentes para apoyar la hipótesis de que las galaxias espirales se transforman naturalmente en sistemas SO cuanto todas las fuentes de gas han sido agotadas por la formación de estrellas o por los vientos galácticos. La búsqueda de tales pruebas se centra ahora en intentos para comparar la frecuencia de galaxias SO en una muestra de sistemas de disco en que la velocidad de enrarecimiento de los gases sea alta con la frecuencia de tales galaxias en una segunda muestra en que la velocidad de enrarecimiento de gases sea baja. Si las galaxias SO se formasen a partir de las espirales, sería de esperar que la máxima frecuencia de galaxias SO se encontrase en sistemas con alta velocidad de agotamiento de gases. Si la formación de estrellas es el mecanismo dominante de consumo de gases en las espirales, $\Omega - \Omega_p$ medirá la frecuencia de formación de estrellas e, implícitamente, la velocidad de agotamiento de los gases. De aquí que las SO deberían ser el tipo dominante entre los sistemas de disco que tienen un valor alto de $\Omega - \Omega_p$, es decir, aquellos con un núcleo prominente. Las espirales deberían observarse con la máxima frecuencia entre las galaxias con una relación núcleo a disco más baja y menor valor de $\Omega - \Omega_p$.

Si los vientos galácticos y no la formación de estrellas dominasen el consumo de gas en las últimas fases de la evolución de un disco, sería de esperar que los sistemas con vientos más fuertes fueran los que evolucionasen más rápidamente de espiral a SO. Como las galaxias con una relación alta de núcleo a disco deben ser las que tengan vientos más fuertes, de nuevo sería de esperar que la máxima frecuencia de galaxias SO se diese entre los sistemas en disco con grandes núcleos. Varios investigadores están intentando medir la abundancia relativa de galaxias SO en muestras de sistemas de disco que difieren en su relación núcleo a disco, pero hasta ahora no se han presentado resultados definitivos.



CUMULO DE GALAXIAS en Coma Berenices; situado a distancia de unos 420 millones de años-luz, se trata de un cúmulo rico, centralmente concentrado con varios millares de miembros, de los cuales sólo una fracción está incluida en este negativo de una fotografía hecha con el reflector de cuatro metros de Kitt Peak. La región central del cúmulo se halla dominada por galaxias SO y galaxias elípticas. Son raras las galaxias espirales.

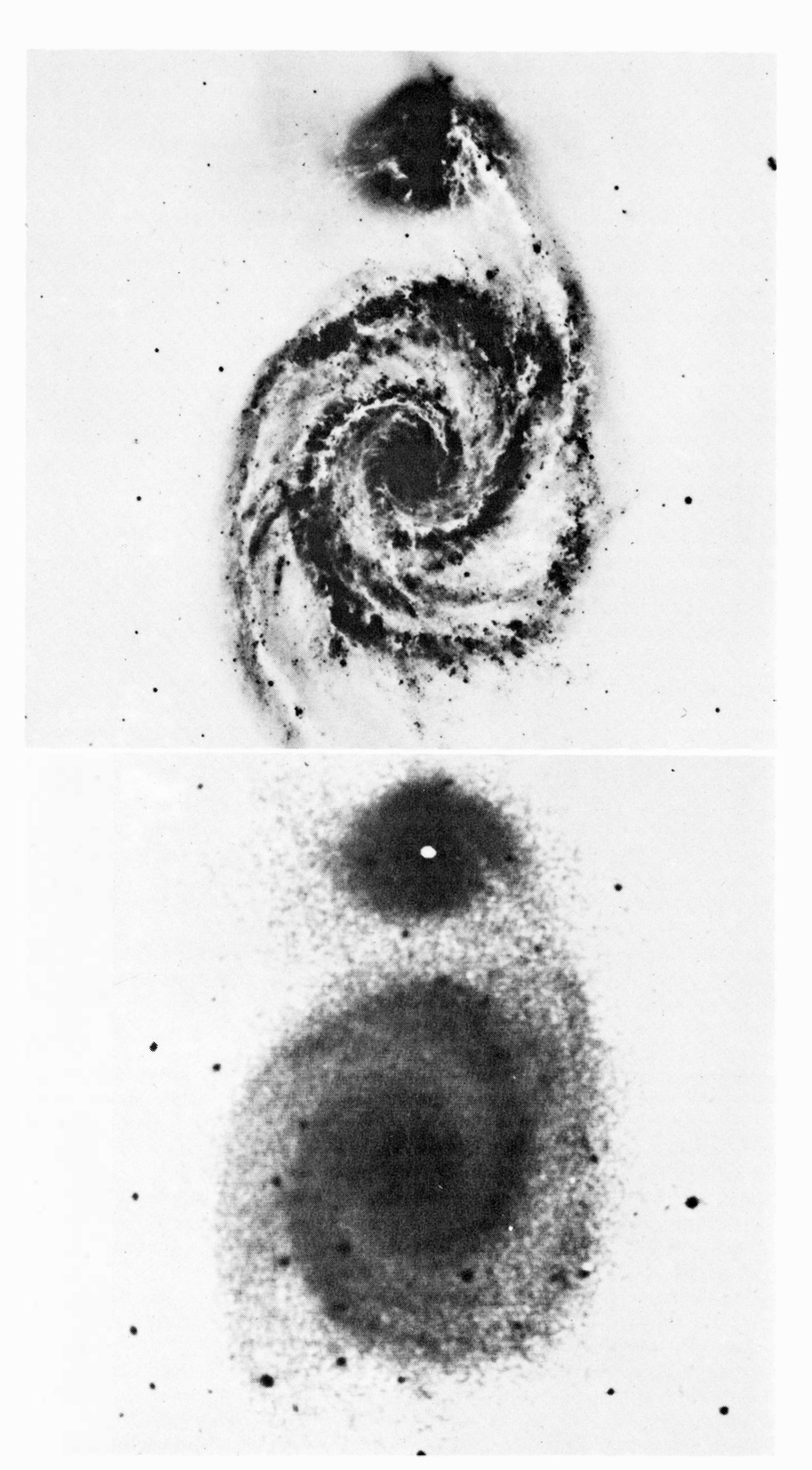


CUMULO DE GALAXIAS EN HERCULES: sistema abierto e irregular a una distancia de 740 millones de años luz. Sus varios millares de miembros están mucho menos densamente distribuidos que en el cúmulo del Coma. A diferencia de éste, el de Hércules incluye una elevada proporción de galaxias espirales. Mientras que el gas caliente intragaláctico en el cúmulo del Coma es una intensa fuente de rayos X, el cúmulo de Hércules muestra pocos indicios de gas entre galaxias y no es emisor de rayos X. La fotografía del cúmulo se hizo con el reflector de 4 metros de Kitt Peak.

Si la extracción de gas de una galaxia espiral da lugar a una transición evolucionando a una galaxia SO, ¿de qué modo se explica la mayor frecuencia de tales transiciones en los cúmulos ricos de galaxias? Observaciones recientes mediante rayos X hechas en cúmulos de galaxias han suministrado quizá el indicio esencial para la solución del misterio. Las exploraciones del cielo con rayos X en el dominio de energía de fotones entre 1000 y 10.000 electronvolt realizadas por el satélite *Uhuru* revelan cierto número de fuentes luminosas de rayos X asociadas a cúmulos ricos de galaxias. El flujo de rayos X parece ser máximo en los cúmulos que tienen la masa total más alta, la máxima densidad de galaxias y la máxima concentración de galaxias hacia el centro del cúmulo. Se cree que los rayos X representan la radiación emitida por electrones energéticos que son acelerados en un campo de iones positivos. La emisión surge del interior de un medio intracumular cuya densidad varía de uno a 10 electrones por 100.000 centímetros cúbicos elevado a una temperatura de aproximadamente 10^8 grados Kelvin. La densidad del gas es máxima en el centro del cúmulo y decrece suavemente hacia su periferia.

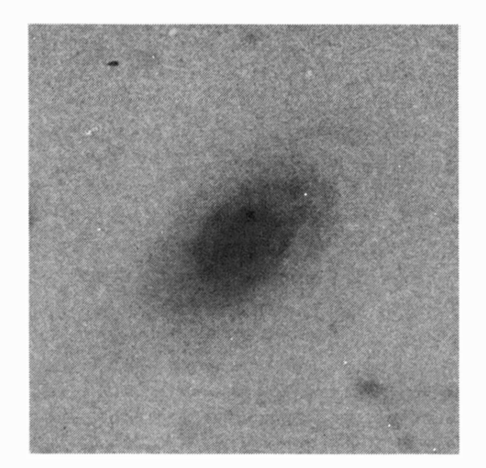
J. Richard Gott III, de la Universidad de Princeton, y James E. Gunn, del Instituto de Tecnología de California, sugieren que las galaxias espirales que se mueven en el seno del medio intracumular están sometidas a una presión de "choque" suficiente para eliminar el gas del disco. Tal presión depende de la densidad del gas en el interior del medio intracumular y de la velocidad de la galaxia respecto al medio: la presión es máxima para medios densos y velocidades altas. A partir de estimas de densidad basadas en observaciones de cúmulos ricos de galaxias realizadas con rayos X en la constelación Coma Berenice y de medidas de velocidad de cúmulos individuales de galaxias, Gott y Gunn llegan a la conclusión de que las galaxias espirales que pasan a través del centro del cúmulo no pueden retener el gas del disco. En tales regiones, las espirales son por tanto libres para completar su desarrollo evolutivo normal.

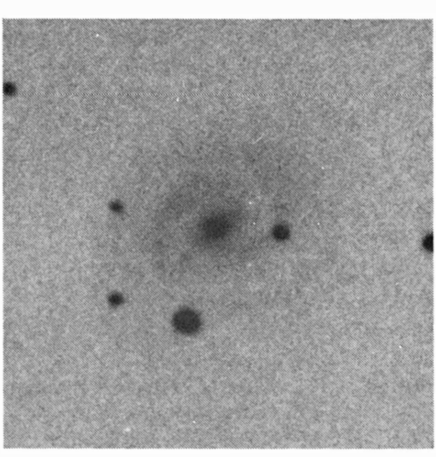
Los diversos modelos de la evolución galáctica que intentan explicar los caminos divergentes que conducen o bien a galaxias elípticas o bien a galaxias espirales se pueden someter a prueba de tres maneras generales. La primera es estudiar muestras de galaxias en cúmulos próximos. La segunda es comparar las características de galaxias próximas con las de las más distantes (y por ello las

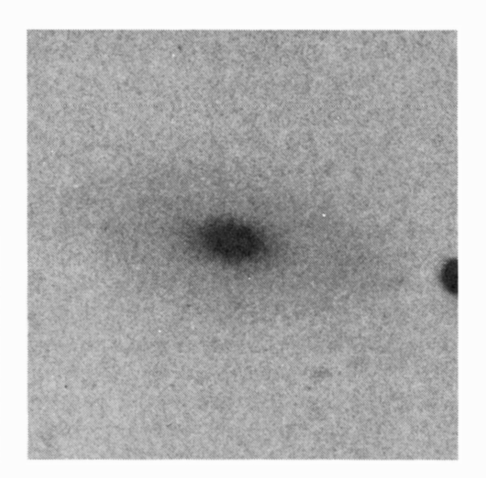


MESSIER 51 consta de una magnífica galaxia espiral, NGC 5194, y un pequeño compañero irregular, NGC 5159, a unos diez millones de años-luz. Cuando las galaxias se fotografían en luz azul (*arriba*), los brazos espirales del sistema grande quedan claramente delineados por complejos de estrellas jóvenes y calientes y sus regiones asociadas de hidrógeno ionizado. Cuando las galaxias se fotografían en el infrarrojo próximo (*abajo*), las imágenes están dominadas por la población de estrellas que son más antiguas, más frías y más rojas. La foto en el infrarrojo revela las crestas de ondas bastante suavizadas, que representan la posición en ese momento de la configuración ondulatoria en el disco del gran sistema espiral. La foto con luz azul se hizo con el telescopio reflector de 4 metros de Kitt Peak. La infrarroja fue tomada por Eric Jensen con un intensificador de imagen en el telescopio de 90 cm de Kitt Peak.

DOS GALAXIAS ESPIRALES de "brazos lisos", NGC 01350 y NGC 01344. Pueden apreciarse en la parte inferior de este negativo del cúmulo de galaxias Abell 262. Su aspecto es claramente distinto del de la galaxia espiral NGC 01347 (*parte superior central*), en la cual son claramente visible los nudos de estrellas recientemente formadas y de gas ionizado. Se cree que los sistemas de brazos lisos son galaxias espirales cuyo gas en el disco ha sido extraído de ellas en los últimos mil millones de años, bien por el "viento" intragaláctico o como resultado del movimiento de la galaxia en el seno del medio intergaláctico. Abell 262, que está a unos 300 millones de años-luz, es un cúmulo que emite rayos X. Foto tomada en Kitt Peak.







TRES ESPIRALES de brazos lisos que pueden representar "instantáneas" de galaxias espirales sorprendidas en el proceso de transformarse en galaxias SO a medida que van siendo despojadas del gas de su disco. La galaxia NGC 3860 (*izquierda*) tiene brazos suavizados pero claramente visibles con ondas de gran amplitud. En NGC 1268 (*centro*), un miembro del cúmulo rico de Perseo, las crestas de las ondas en los brazos espirales son mucho menos visibles. En IC 2951 (*derecha*), y también en Abell 1367, los brazos casi han desaparecido. El análisis del color sugiere que NGC 3860 fue despojada de su gas hace entre 10^8 y 10^9 años, mientras que IC 2951 lo fue hace más de 2×10^9 años. Las fotografías se hicieron en Kitt Peak.

más jóvenes que se pueden observar). La tercera es la búsqueda de galaxias próximas que den señales de ser más jóvenes que los sistemas próximos típicos. Los tres enfoques se citan en el orden de su dificultad, y los discutiremos ahora en el mismo orden.

Los estudios de la distribución detallada de galaxias SO y espirales en cúmulos próximos apoyan considerablemente la explicación de Gott-Gunn sobre cómo pueden las galaxias espirales de cúmulos ricos ser despojadas de su gas en el disco. Jorge Melnick y Wallace L. W. Sargent, del Instituto de Tecnología de California, y Neta A. Bahcall, de Princeton, han calculado la frecuencia con que se dan las galaxias SO en cierto número de cúmulos de galaxias de los que se sabe que son fuentes de rayos X. Sus datos muestran que la frecuencia es máxima en los cúmulos que tienen la máxima amplitud en velocidades galácticas y las máximas luminosidades en rayos X. En tal medio es de esperar que el despojamiento de las galaxias espirales presente la máxima eficacia. Melnick y Sargent han encontrado también que la frecuencia de galaxias SO decrece en las regiones periféricas de todos los cúmulos en la muestra estudiada, resultado que concuerda con la menor probabilidad de despojamiento en las regiones de los cúmulos caracterizadas por una menor densidad del gas.

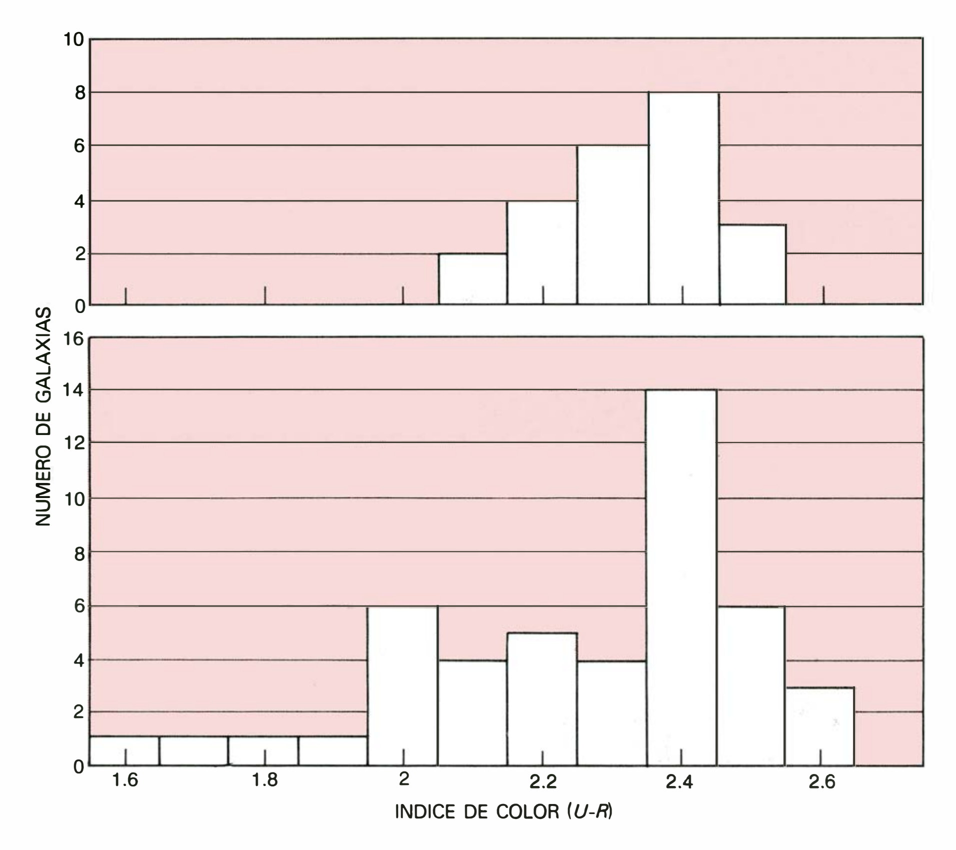
En el Observatorio Nacional de Kitt Peak, trabajando en colaboración con Susan Wilkerson y Eric Jensen, hemos encontrado recientemente ejemplos de galaxias que pueden haber sido despojadas de su gas en el disco en el término de los últimos miles de millones de años. El examen de las fotografías de los cúmulos de galaxias emisores de rayos X revela cierto número de galaxias de disco donde no se ven complejos estelares de reciente formación, pero en las que la configuración ondulada en espiral en las antiguas estrellas del disco todavía aparece claramente. Pueden verse varios ejemplos de tales espirales con "brazos difusos" en los cúmulos Abell 262 y Abell 1367 [*veánse las ilustraciones de la página opuesta y superior*]. La amplitud de la onda espiral (medida por el contraste entre el brillo superficial de las regiones ocupadas por brazos y las regiones entre ellos) parece estar correlacionada con el color medido en el disco: las mayores amplitudes de onda están asociadas con los discos más azules, y los sistemas con menor amplitud de onda tienen los discos más rojos. Los colores azules son característicos de agregados estelares en los cuales las estrellas se han formado en época relativamente reciente; los colores rojos sugieren que no se han formado estrellas durante varios miles de millones de años.



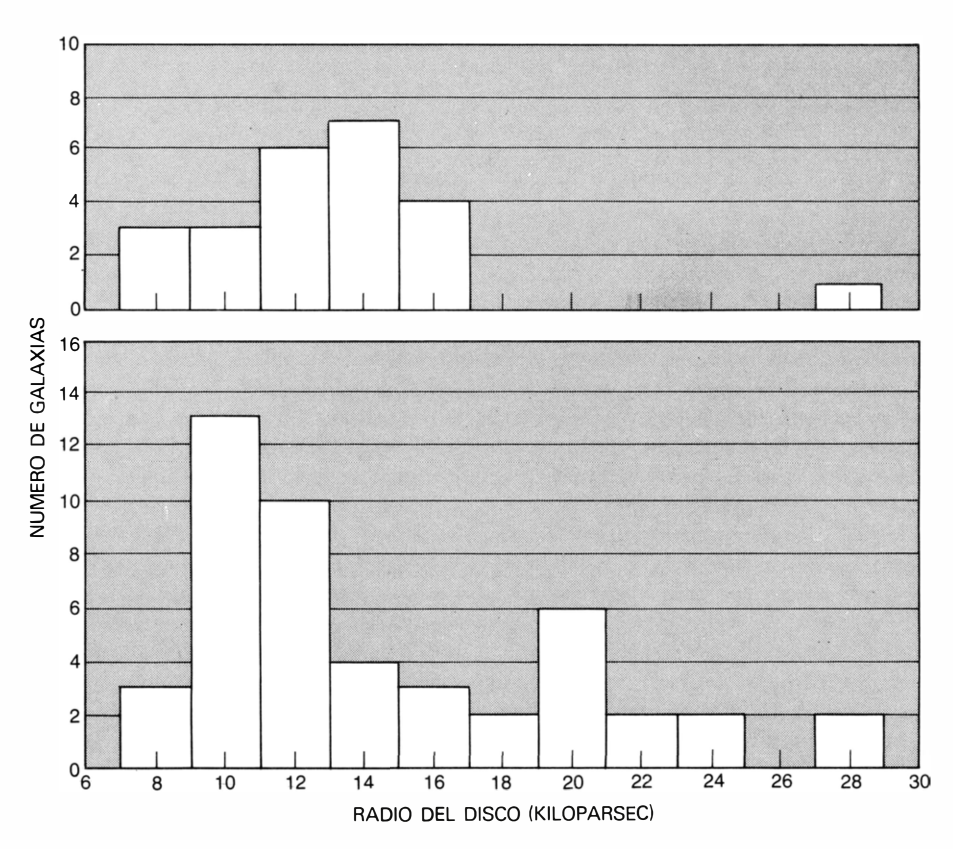
CAMPO en la proximidad de la galaxia espiral de brazos lisos NGC 3860 en el cúmulo Abell; aparece en una composición fotográfica en color preparada con la ayuda del sistema interactivo de procesado de fotografías de Kitt Peak. Los colores se obtuvieron ponderando los valores en tres fotografías en blanco y negro hechas con el telescopio de cuatro metros en las regiones ultravioleta, azul-verde y roja del espectro. Los colores amarillo-rojo de la espiral son típicos de estrellas antiguas en los sistemas de disco. Las tiras azules de forma irregular pueden ser gas ionizado recientemente arrancado de NGC 3860 al moverse en el seno del gas intracumular a una velocidad de 1500 kilómetros por segundo.

Creemos que las espirales con brazos difusos y pequeña amplitud de onda son galaxias a las que despojaron del gas de sus discos y cesaron de formar estrellas hace varios miles de millones de años; están acercándose al final de su transformación desde la configuración espiral a la SO. En tales galaxias, la población estelar del disco está dominada por las estrellas rojizas, de vida más larga. Las espirales con una elevada amplitud de onda y brazos difusos pueden ser galaxias que fueron despojadas del gas de sus discos hace sólo unos pocos cientos de millones de años. Como resultado, su color todavía refleja la contribución de las estrellas jóvenes y azules que se formaron inmediatamente antes de que desapareciera el gas.

La galaxia espiral de brazos difusos NGC 3860, situada en el cúmulo de rayos X Abell 1367, parece estar rodeada de "tiras" que pueden estar formadas por gas ionizado recientemente separado del sistema. Como no hay otra galaxia en el cúmulo que esté rodeada de tiras de apariencia semejante, la asociación genética entre las tiras y la NGC 3860 parece altamente plausible. Sin embargo, para una prueba más definitiva de que las tiras han sido separadas de NGC 3860 hay que aguardar a un estudio espectroscópico. Si las velocidades según la visual tanto de las tiras como de la galaxia son próximas a la velocidad media de otras galaxias en el cúmulo, se puede estar casi seguro de que las tiras son parte del cúmulo de galaxias Abell 1367. Además, si las abundancias de los elementos químicos en las tiras (determinadas por análisis espectroscópico) son semejantes a las abundancias características en el gas de disco en las galaxias espirales corrientes, se puede concluir que las tiras fueron arrancadas del disco de NGC 3860. Si las velocidades medidas y la composición química deducida para las tiras indican que se originaron en NGC 3860, la hipótesis del despojamiento habrá pasado satisfactoriamente la prueba más directa.



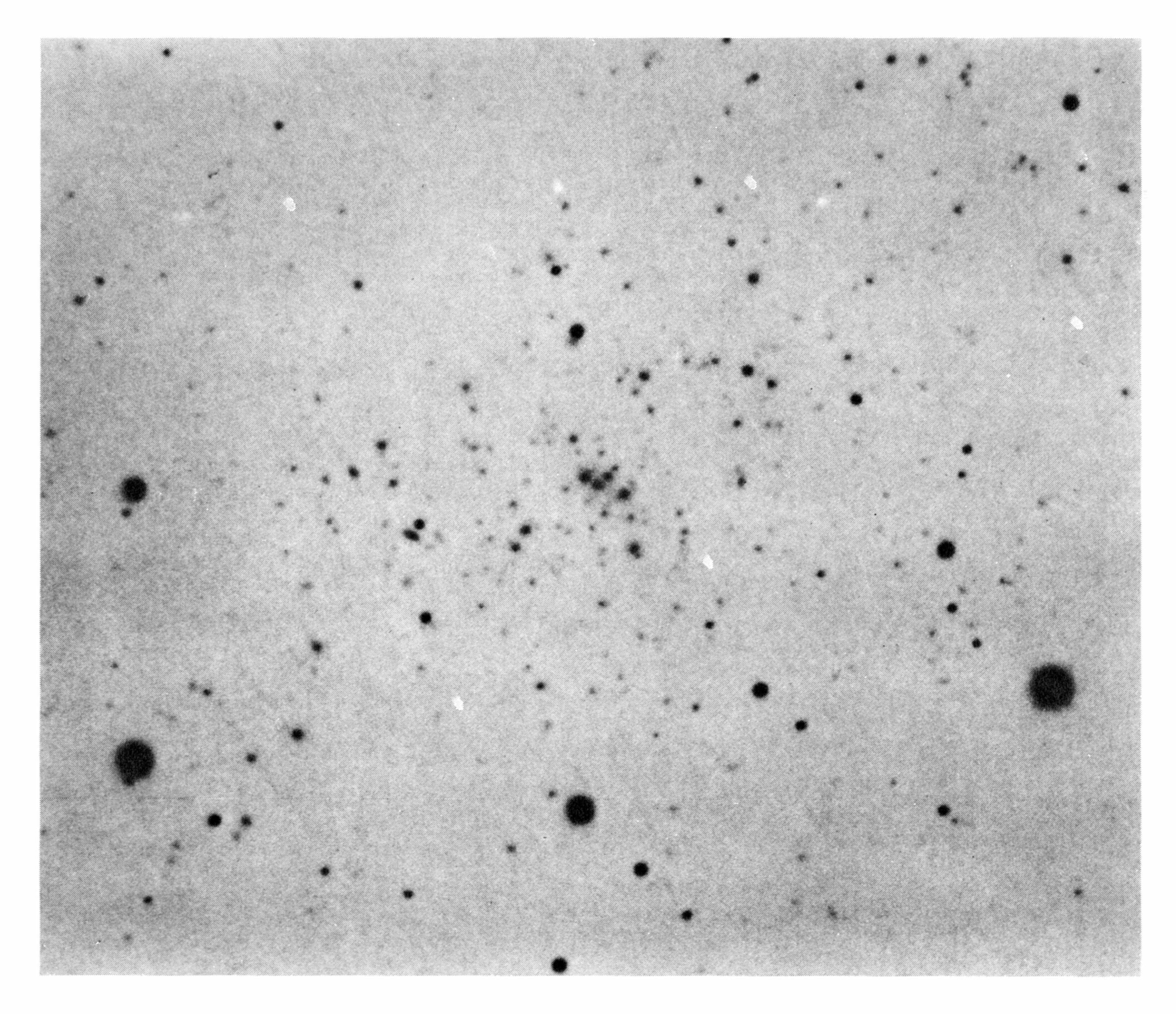
DIFERENCIAS EN LOS COLORES de los discos observadas al comparar las galaxias SO situadas de frente que se hallan a 2,1 millones de años-luz del núcleo del cúmulo del Coma (*parte superior*) con las galaxias SO, también situadas de frente pero a mayores distancias el núcleo (*parte inferior*). Para esta comparación, el índice de color del disco (*U-R*) mide la relación, en escala logarítmica, de las luminosidades en el rojo y en el ultravioleta próximo. Los valores grandes de *U-R* significan que el disco es predominantemente rojo, conteniendo así pocas estrellas de formación reciente. (Dibujo de Ilil Abel.)



DIFERENCIAS EN EL TAMAÑO de los discos observadas también al comparar las galaxias SO situadas de frente a distancia menor de 2,1 millones de años-luz del núcleo del cúmulo del Coma (*arriba*) con galaxias semejantes, pero más distantes (*abajo*). Hay más discos de tamaño grande en las regiones externas del cúmulo del Coma que en las interiores. Un kiloparsec equivale a 3260 años-luz.

Los colores observados en los sistemas SO del cúmulo de galaxias Coma Berenices también apoyan la representación de Gott-Gunn. Cuando analizamos la distribución de frecuencias de los colores de discos para las galaxias SO que están de frente en el cúmulo del Coma, encontramos que la región más externa del cúmulo parece contener una cantidad apreciablemente mayor de galaxias SO azuladas que la región central. Los discos de color rojizo característicos de la región central del cúmulo del Coma sugieren que las galaxias espirales se transformaron en SO hace bastantes miles de millones de años. La presencia de SO azules en la región periférica del cúmulo se puede explicar mediante dos hipótesis plausibles. La primera de ellas supone que las SO azules fueron despojadas del gas de su disco un poco después de una excursión a través de las regiones centrales del cúmulo, donde la densidad del gas intracumular es suficiente para realizar el despojo. La segunda hipótesis admite que las galaxias SO azules se formaron a partir de galaxias espirales en las que el gas no fue extraído, sino que se agotó en la formación de muchas generaciones de estrellas. Si las últimas estrellas se formaron en el millar de millones de años anterior al momento presente, las reliquias azules de esos sucesos podrían dar cuenta de los colores observados.

Los tamaños de las galaxias de disco en el cúmulo del Coma parecen también mostrar el efecto del medio circundante en la evolución de tales galaxias. Una representación de la distribución de frecuencias de los tamaños medidos de las galaxias SO que están de frente en las partes central y periférica del cúmulo del Coma muestra que hay muchos más discos grandes en las regiones periféricas. Este resultado se podría explicar si la formación de estrellas hubiese sido interrumpida por la extracción del gas del disco en una fase relativamente temprana de la historia de la evolución de los sistemas de disco en la región central. Como la conversión de gas en estrellas se efectúa con la máxima lentitud en las regiones periféricas de la galaxia, se puede pensar que antes de que el gas fuese eliminado se habían formado relativamente pocas estrellas. Las SO en las regiones externas del cúmulo, menos afectadas por la extracción del gas, podrían haber completado una fracción mayor de su historia natural evolutiva y podrían haber formado, por tanto, mayor número de estrellas en la parte periférica del disco. Sin embargo, esta interpretación puede complicarse algo como consecuencia de la posible impor-



UNO DE LOS CUMULOS MAS DISTANTES, C1 0024 + 1654, se está alejando de la Tierra a 0,39 veces la velocidad de la luz, lo que implica que se encuentra a una distancia de casi siete mil millones de años-luz. El estudio de tales cúmulos puede potencialmente revelar si las galaxias, vistas tal como eran hace mucho tiempo, han evolucionado menos que las galaxias más antiguas que pueblan los cúmulos mucho más cercanos. El cúmulo C1 0024 + 1645 está tan lejano que sus galaxias son difícilmente discernibles de las estrellas dentro de nuestra propia galaxia. El cúmulo consta de varios cientos de galaxias, la mayor parte de los cuales se ven en la placa de donde se obtuvo esta copia. (Tomada con el reflector de 4 m de Kitt Peak.)

tancia de interacciones gravitatorias de galaxias en la densa región central del cúmulo del Coma. No obstante, los estudios de galaxias de disco en cúmulos cercanos tienden a apoyar el punto de vista de que la historia evolutiva de las galaxias queda apreciablemente afectada por los factores ambientales.

El segundo enfoque general para someter a prueba los modelos de evolución galáctica lleva consigo el estudio de las galaxias más remotas. Las galaxias con brillos entre 10^{11} y 10^{12} veces el del Sol se pueden observar hasta distancias muy grandes. El tiempo que tarda la luz en viajar desde los sistemas más distantes observados hasta la fecha se acerca a diez mil millones de años. Las observaciones de galaxias lejanas situadas a diversas distancias, equivalente a "mirar hacia atrás" en el tiempo, ofrece la posibilidad de medir directamente los cambios evolutivos. Por desgracia, las galaxias a distancias superiores a cuatro mil millones de años-luz tienen un tamaño angular de sólo unos pocos segundos de arco, lo que es solamente un poco mayor que las distorsiones medias de la imagen introducidas por el paso de la luz galáctica a través de la turbulenta atmósfera terrestre. Como resultado, incluso los mayores telescopios terrestres son incapaces de revelar el detalle estructural necesario para clasificar las galaxias como espirales, SO o elípticas.

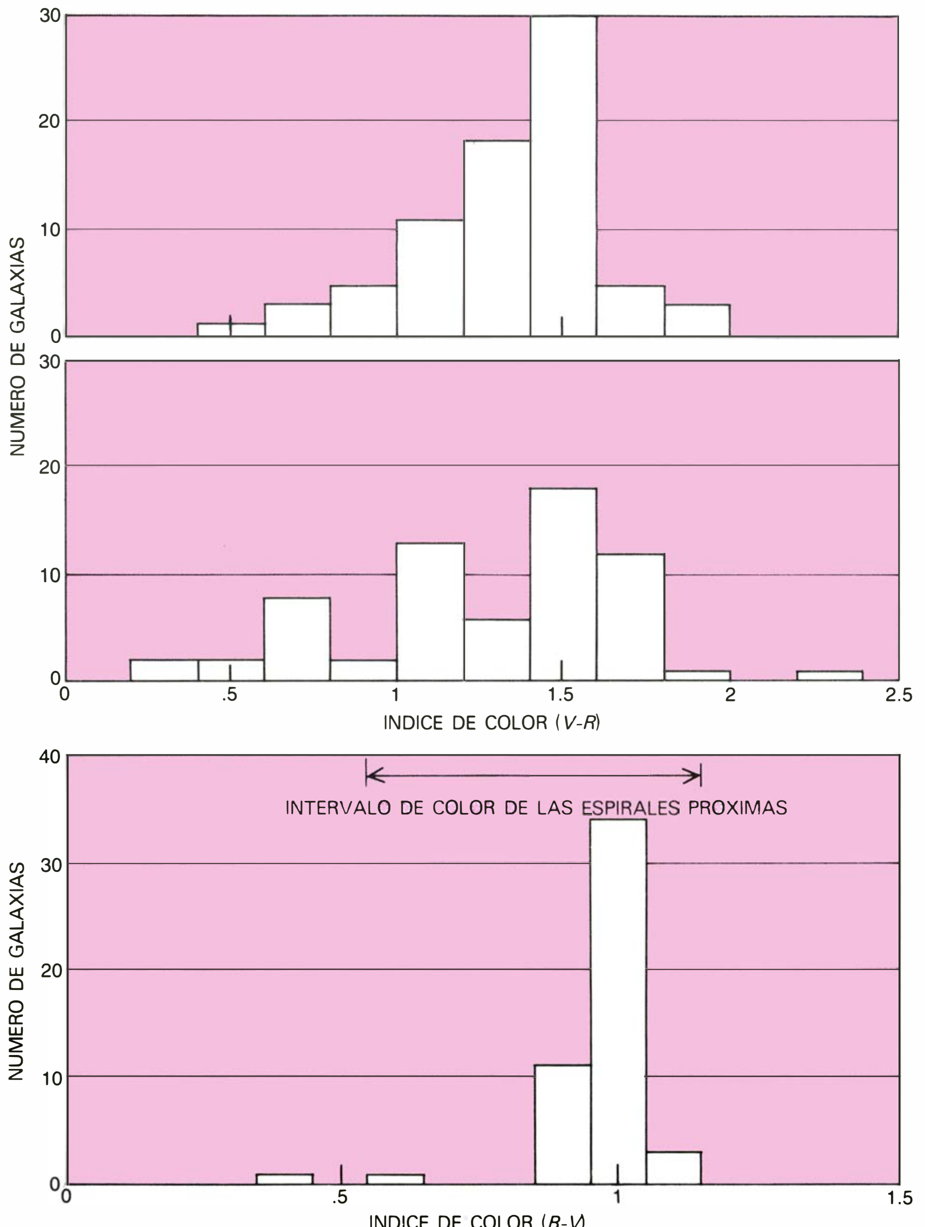
A fines de 1983 o comienzos de 1984, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) situará en órbita un telescopio de 2,4 metros mediante la lanzadera espacial. La cámara de televisión de imagen directa en el observatorio orbital será capaz de resolver puntos separados por solamente 0,5 segundos de arco, lo que hace posible clasificar las galaxias y llevar a cabo toscos estudios estructurales correspondientes a tiempos hacia atrás de más de cinco mil millones de años. Hasta entonces, se puede realizar un progreso considerable comparando luminosidades y colores medidos para galaxias distantes con los observados en sistemas próximos. Si se observan muestras de galaxias razonablemente grandes, debe ser posible estimar los efectos evolutivos.

La factibilidad de realizar tales estudios empíricos de la evolución de las galaxias ha sido puesta de manifiesto

recientemente por Harvey Butcher, de Kitt Peak, y Augustus Oemler, Jr., de la Universidad de Yale. Con la ayuda de un detector sensible con cámara de televisión desarrollado en Kitt Peak por C. Roger Lynds, Butcher y Oemler han registrado las luminosidades y colores de una amplia muestra de galaxias en dos cúmulos lejanos, uno a siete mil millones de años luz y el otro a ocho mil ochocientos millones. El cúmulo más próximo, conocido por Cl 0024 + 1654, se está dejando a una velocidad de 0,39 veces la de la luz. El más lejano, un cúmulo que rodea la radio-galaxia 3C 295, se está alejando a una velocidad de 0,46 veces la de la luz.

Esos dos cúmulos lejanos parecen ser tan ricos en galaxias y tan centralmente concentrados como lo es el cúmulo del Coma. Si hace unos ocho mil millones de años hubieran estado en un estado tan avanzado de evolución como lo está el relativamente cercano cúmulo del Coma (cuya luz ha tardado menos de quinientos millones de años en llegar a nosotros), los dos cúmulos distantes deberían parecerse al cúmulo del Coma, siendo pobres en galaxias espirales y ricos en SO y elípticas. Como recientemente se han formado pocas o ninguna estrella en los sistemas SO y elípticos del cúmulo del Coma, los colores de esas galaxias son predominantemente rojos. Butcher y Oemler observaron que, en contraste, las galaxias más brillantes en los cúmulos distantes incluyen muchos sistemas de color azul, presumiblemente galaxias espirales que están produciendo estrellas nuevas y azules. Admitiendo una correspondencia entre el color y el tipo de las galaxias idéntica a la que se observa en las galaxias próximas, Butcher y Oemler dedujeron que más de la mitad de las galaxias en los cúmulos lejanos son espirales y que el resto son SO o elípticas. En el cúmulo del Coma, menos del 10 por cien de la totalidad de las galaxias son espirales. De aquí que aun cuando el carácter general de los cúmulos lejanos se asemeje al de los próximos, pobres en espirales tales como el cúmulo del Coma, la distribución de tipos de galaxias en ellos parece ser totalmente diferente.

Si las galaxias azules en los dos cúmulos distantes, y por tanto jóvenes, son en realidad espirales, es tentador sugerir que las galaxias de disco en medios semejantes han experimentado cambios evolutivos apreciablemente diferentes en los últimos ocho mil millones de años. Es posible que en cúmulos de galaxias más jóvenes sólo una pequeña fracción de espirales haya sido despojada del gas de su disco y transformada en SO, mientras que en cúmulos semejantes al Coma casi todas las espirales han sido despojadas de él. Habiendo resultados disponibles sólo para dos cúmulos distantes, es quizá prematuro aceptar esta explicación para la diferencia entre las distribuciones de color observadas. Sin embargo, la aplicación de detectores panorámicos sensibles a la investigación de cúmulos distantes promete suministrar adiciones y problemas al tema de la evolución galáctica.



NOTABLES DIFERENCIAS en los colores de las galaxias, según se desprende de la comparación entre la distribución de los colores en el cercano cúmulo del Coma (*abajo*) y la distribución de colores de dos cúmulos muy distantes, Cl 0024 + 1645 (*arriba*) y 3C 295 (*centro*). El cúmulo 3C 295, que se está alejando a 0,46 veces la velocidad de la luz, se ve tal como era hace unos 8800 millones de años. Los colores en el cúmulo del Coma se expresan en términos del índice *B-V*, que mide la relación de la luz "visual" observada (longitud de onda 0,55 micrometros) a la luz azul (longitud de onda 0,42 micrometros) en escala logarítmica. Los colores en las dos galaxias distantes se dan en términos de sistema *V-R*, en el que la medida en el rojo se realiza a 0,65 micrometros. Cuando se representa, el índice *V-R* equivale casi al *B-V* en el sistema de referencia en reposo respecto a los cúmulos que se alejan. La distribución de los colores de las galaxias en los cúmulos distantes es decididamente más ancha que en el cúmulo del Coma, y de hecho es mucho más próxima al intervalo de colores característico de galaxias espirales próximas. Así, aunque los cúmulos distantes son equivalentes en riqueza y concentración de galaxias al cúmulo del Coma, parecen contener muchas más galaxias espirales. Esto sugiere que si el cúmulo del Coma se pudiera observar tal como era hace siete u ocho mil millones de años, todavía no se habrían convertido algunas de sus galaxias espirales en SO y en elípticas por pérdida de su gas.

La tercera manera de someter a prueba las hipótesis sobre la evolución de las galaxias es buscar galaxias espirales cercanas cuyo desarrollo parece haber sido "retrasado". Trabajando en colaboración con William Romanishin, estudiamos una clase de galaxias espirales cuyo brillo superficial, o luminosidad por unidad de superficie, es tan bajo que son claramente discernibles solamente en placas de larga exposición hechas con

el telescopio Schmidt de 1,2 metros del Monte Palomar y con el reflector Mayall de cuatro metros en Kitt Peak. Aunque tales sistemas de bajo brillo superficial (LSB) no están a más de 60 millones de años-luz, son a duras penas visibles por encima de la luz de fondo del cielo. Por lo demás, son semejantes en tamaño y apariencia a las espirales brillantes normales. La principal diferencia es que los discos de las galaxias LSB son considerablemente más azules que los discos de las galaxias espirales normales.

La combinación de bajo brillo superficial y color azul sugiere que, comparados con los discos de las espirales normales, los discos de las LSB están habitualmente poblados por relativamente pocas estrellas. De aquí que la principal contribución a la luz de los discos LSB debe proceder de estrellas relativamente azules, de edad inferior a tres o cuatro mil millones de años. En contraste, los colores rojos de los discos de las galaxias semejantes a la nuestra sugiere que una aplastante mayoría de las estrellas de sus discos se formaron probablemente hace más de diez mil millones de años. Si la formación de estrellas en las galaxias LSB ha sido relativamente ineficaz (o posiblemente no ha existido) hasta un pasado comparativamente reciente, los sistemas LSB pueden no haber consumido una fracción muy grande del gas inicialmente presente en sus discos.

Recientemente, la observación de varias galaxias del tipo LSB en la longitud de radio-onda de 21 centímetros emitida por el hidrógeno interestelar no ionizado ha suministrado una confirmación provisional de esta especulación. Trabajando con la antena parabólica de 330 metros en Arecibo, Puerto Rico, Nathan Krumm, E. E. Salpeter, Romanishin y nosotros encontramos que algunas de las espirales LSB contienen evidentemente más del doble de la cantidad de hidrógeno que se encuentra en las espirales normales del mismo tipo. Si las galaxias LSB son efectivamente sistemas en disco que están relativamente menos evolucionados que las espirales normales, el estudio de esta clase de espirales próximas puede permitir echar un vistazo a la historia de nuestra galaxia.

El estudio de las galaxias está entrando en una nueva fase. En el pasado, mucho de lo que se sabe acerca de la estructura galáctica se obtuvo del examen cualitativo de fotografías hechas con grandes telescopios. Los esfuerzos iniciales para clasificar las galaxias, basados en su aspecto general, suministraron la base de mucha de la actual comprensión física de la estructura galáctica. Con el advenimiento de los detectores panorámicos sensibles y métodos avanzados de cálculo para el análisis de fotografías digitalizadas se puede ahora cuantificar el color de las galaxias y la distribución del brillo superficial. Por ejemplo, muchos de los nuevos resultados de los que se ha dado cuenta aquí se obtuvieron con el nuevo sistema interactivo de procesado de imágenes (IPPS) desarrollado en Kitt Peak. El sistema permite obtener fotografías digitalizadas de galaxias, contrastarlas poniendo de relieve niveles dados de brillo y elegir regiones particulares para las cuales, por ejemplo, se desea una medida de brillo o color. La interacción rápida y en tiempo real con los datos en la fotografía aumenta el rendimiento del análisis de datos, haciendo posible estudiar cientos de galaxias en una gran variedad de situaciones.

Esperamos que tal estudio cuantitativo hará posible enfocar empíricamente por primera vez una gran variedad de problemas fundamentales. ¿Son las galaxias de un tipo dado básicamente semejantes en cuanto a estructura, o bien galaxias del mismo aspecto pertenecientes a cúmulos ricos muestran diferencias mensurables con respecto a sus homólogas que no pertenecen a cúmulos? Si tales diferencias existen ¿cuál es su explicación? ¿Pueden los efectos ambientales, tales como el despojamiento del gas del disco, dar cuenta de todas las diferencias estructurales, o es posible que las galaxias que se encuentran en las densas regiones centrales de los cúmulos ricos se formasen de una manera fundamentalmente diferente de aquella como se formaron las galaxias situadas fuera de los cúmulos o en cúmulos irregulares? ¿Es la historia de la formación de estrellas y la evolución dinámica de las galaxias de cúmulos distinta de la de aquellas que no forman parte de éstos?

Además de sus implicaciones respecto al conocimiento de la historia de la vida de las galaxias, las respuestas a tales preguntas afectarán directamente la confianza que los astrónomos pueden depositar en los intentos para usar galaxias como patrones de brillo y distancia al explorar la estructura en gran escala del universo. De tales estudios se puede también obtener información sobre los tamaños y masas de las primeras condensaciones que se formaron en la primitiva evolución del universo. ¿Tenían esas condensaciones el tamaño de estrellas, cúmulos de estrellas, galaxias o cúmulos de galaxias? Nuestra puesta a punto resume algunos resultados obtenidos en la renovada campaña para comprender cómo se forman y evolucionan las galaxias.

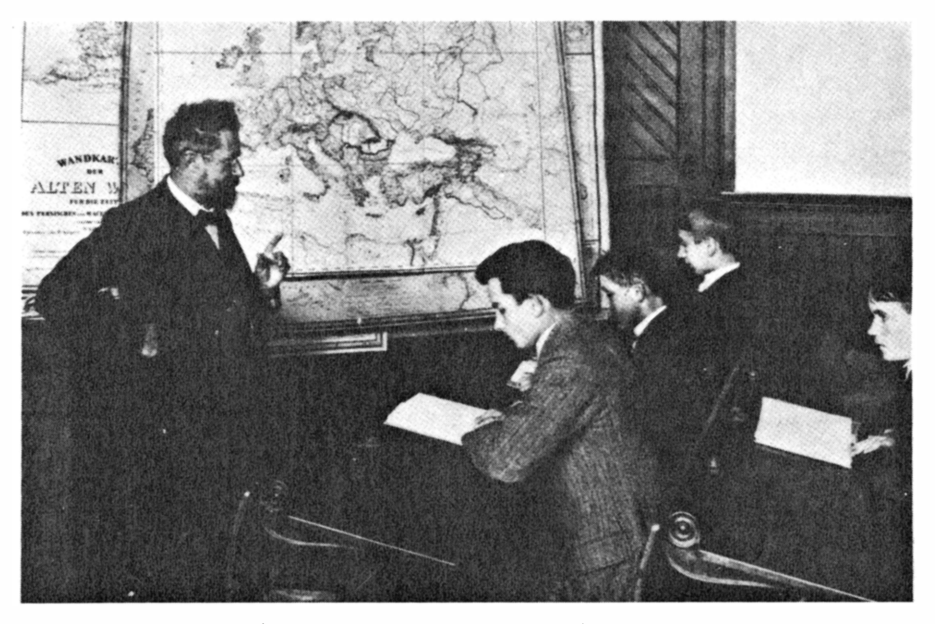
Ciencia y sociedad

Centenario de Einstein

Albert Einstein, judío de origen, era por su nacimiento e infancia alemán. Nacido en Ulm el 14 de marzo de 1879, cursó seis años de estudios medios en el Luitpold-Gymnasium de Munich. Sus recuerdos de este tiempo hablan de "una escuela que por principio funciona con los métodos del miedo, la violencia y la autoridad artificial". A los 16 años, trasladado a Suiza, renuncia a su ciudadanía alemana y solicita "un derecho de ciudadanía cantonal y comunal suizo". Este le será concedido en el cantón y ciudad de Zürich, una vez pasados cinco años de residencia ininterrumpida en Suiza, el 8 de marzo de 1900. Einstein conservará toda su vida la ciudadanía suiza, aunque sucesivamente poseyera también la austríaca durante su año en Praga, la alemana durante sus veinte años en Berlín y la americana durante sus veintidós años en Princeton.

Sus años de juventud en Suiza fueron los decisivos de su formación científica y los más geniales de su carrera investigadora. Basta mencionar sus tres famosos trabajos sobre el fotón, el movimiento browniano y la relatividad especial, escritos los tres en Berna durante su "año estelar" de 1905. Los tres son revolucionarios desde el punto de vista conceptual. El primero es un paso fundamental en la futura evolución de la física cuántica; al radicalizar las ideas cuánticas de Max Planck, posibilita la futura cuantificación del átomo de Bohr (1913); al introducir una nueva imagen corpuscular frente a la imagen ondulatoria de la luz, inspirará la mecánica ondulatoria de de Broglie y Schrödinger (1924-26), que tratará del mismo modo los corpúsculos materiales. El segundo artículo permite un nuevo acceso al mundo atómico –inadmisible entonces para los positivistas– y una nueva medida de sus dimensiones. El tercer artículo introduce la nueva relatividad especial, a costa de abandonar los conceptos más básicos de la física, los de tiempo y espacio como magnitudes independientes. Vale pues la pena recorrer esta etapa de su vida en Suiza, con cuyas situaciones y contactos humanos está íntimamente ligada la génesis de esas ideas creadoras.

Einstein se traslada a Suiza con la ilusión de estudiar ingeniería en el famoso Politécnico federal de Zürich. Pero por falta de conocimientos de biología y lenguas modernas, es suspendido en el examen de ingreso, a juicio del propio Einstein, con toda justicia. Para prepararse mejor, se matricula el curso 1895-96 en la escuela cantonal de Aarau. Allí estudia tercero y cuarto cursos de la sección de artes y oficios, bajo la inmediata dirección del Dr. Jost Winteler. Esta escuela suiza le dejará "una impresión inolvidable por su espíritu liberal y por la sencilla seriedad del profesor, que no necesitaba apoyarse en ningún tipo de autoridad externa". Según recordará en varias ocasiones el propio Einstein, es entonces, a sus 16 años, cuando le sorprenden las paradojas físicas que encerraría un movimiento a la velocidad de la luz: "Durante ese año en Aarau, se me ocurrió este problema: Si uno corriera delante de una fuente luminosa a la velocidad de la luz, experimentaría un campo de ondas electromagnéticas independiente del tiempo. ¡Pero tal tipo de campo parece que no pueda existir! Esta fue, en su forma infantil, mi primera experiencia mental relacionada con la relatividad especial." La solución del problema le costará diez años a Einstein, y será de lo más revolucionaria, como acabamos de indicar.



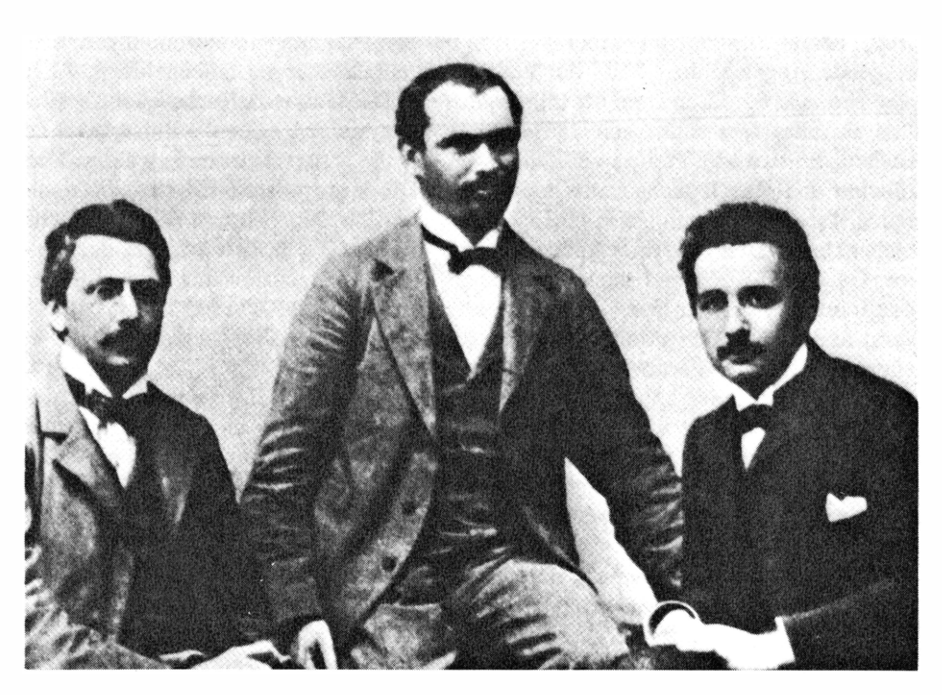
Einstein a los 16 años [**en el primer banco, al fondo**] *en clase del Dr. Jost Winteler, en Aarau. De esta época en su paradoja sobre lo que se experimentaría "si uno corriera delante de una fuente luminosa, a la velociada de la luz"*

El curso siguiente Einstein logra ingresar en el Politécnico de Zürich, donde estudia matemáticas y física. Más tarde recordará, en su autobiografía: "Allí tuve profesores excelentes (p. ej. Hurwitz, Minkowski), así que hubiera podido adquirir muy bien una formación matemática profunda. Sin embargo, la mayor parte del tiempo la pasaba trabajando en el laboratorio de física, fascinado por el contacto directo con la experimentación. El tiempo restante lo empleaba fundamentalmente leyendo en casa las obras de Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, etc." La mentalidad mecanicista, entonces dominante, de estos autores físicos, la superará muy pronto, apoyado como veremos en nuevas lecturas. Su profesor de matemáticas Minkowski es quien hará más patente y manejable la relatividad especial, al introducir su formulación geométrica cuadridimensional.

El curriculum vitae de sus estudios y su primera docencia privada puede leerse en un documento de la época, de puño y letra de Einstein: "Adquirí mis conocimientos especiales en el campo de la física y la electrónica en la escuela para profesores con especialidad físico-matemática del Politécnico federal de Zürich, institución en la que estuve desde el invierno de 1896 al verano de 1900. Al acabar mis estudios, obtuve allí mismo, mediante un trabajo experimental de física y la superación de un examen, el diploma federal de profesor especializado. Desde el otoño de 1900 a la primavera de 1901 he vivido en Zürich como profesor privado. Durante este tiempo he perfeccionado también mi formación física y he redactado mi primer artículo científico. Del 15 de mayo al 15 de julio de 1901 he trabajado como profesor suplente de matemáticas en el instituto técnico de Winterthur. Desde el 15 de septiembre de 1901 doy clases particulares en Schaffhausen. Durante los dos primeros meses de esta actividad he redactado mi tesis doctoral sobre un tema de la teoría cinética de los gases, la cual ha sido presentada hace un mes a la sección segunda de la Facultad Filosófica de la Universidad de Zürich." Ese documento de diciembre de 1901 da a conocer a la vez el rendi-

miento de la investigación solitaria de Einstein, y sus dificultades por encontrar trabajo como físico. En realidad ese documento es una solicitud con la que logrará ser admitido el 23 de junio de 1902 como "perito técnico de 3ª clase" en la "Oficina Federal de Propiedad Intelectual" –léase registro de patentes– de Berna, con un sueldo anual de 3500 francos. Esta colocación resolverá su situación económica durante siete años. Al margen de su trabajo, administrativo y también sugerente, de analizar patentes, Einstein realizará durante sus siete años en Berna una sorprendente actividad investigadora, física y filosófica, que le lanzará a su carrera de físico internacional.

Según el curriculum de Einstein, en 1901 se publica su primer artículo, "Sobre efectos de los fenómenos de capilaridad". Lo importante es que el trabajo sea aceptado por Max Planck (el Max Planck que acaba de introducir el cuanto de acción) para ser publicado en *Annalen der Physik*, la prestigiosa revista de la Sociedad Alemana de Física. A este artículo le seguirán otros cuatro, sobre temas básicos de termodinámica y teoría cinética del calor, publicados en la misma revista durante los tres años siguientes. Según el mismo curriculum, en 1901 Einstein tiene ya redactada su tesis doctoral, que llevará el título "Una nueva determinación de las dimensiones moleculares". En realidad esta tesis (que ocupa 21 páginas) será impresa en Berna en 1905, y defendida en la Universidad de Zürich el 30 de abril del mismo año. En una carta de principios de ese mismo mes de abril, la incluye Einstein junto con las otras tres publicaciones del "año estelar" antes citadas. La carta está dirigida a su amigo Conrad Habicht, que había defendido en Berna su tesis doctoral sobre los cromlechs de la edad de piedra, hacía ya más de un año. La carta no tiene desperdicio como documento humano y científico: "Pero, ¿por qué no me has enviado todavía tu tesis? ¿No sabes, so miserable, que yo sería uno de los dos individuos contados que iban a leerla con interés y placer? A cambio te prometo cuatro trabajos, el primero de los cuales te lo podría enviar pronto, porque recibiré muy pronto los ejemplares gratuitos. Trata de la radiación y las propiedades energéticas de la luz, y es muy revolucionario. Ya lo verás, si me envías antes tu trabajo. El segundo trabajo [la tesis] es una determinación del verdadero tamaño atómico a partir de la difusión y el rozamiento interno de sustancias neutras muy diluidas. El tercero demuestra que, bajo la hipótesis de la teoría molecular del calor, los cuerpos de un tamaño del orden de la milésima de milímetro, puestos en suspensión en un fluido, han de realizar un movimiento desordenado que está producido por el movimiento térmico de éste. Son los movimientos de corpúsculos inanimados en suspensión que de hecho han observado los fisiólogos, y los han llamado movimiento molecular browniano. El cuarto trabajo está todavía en borrador, y es una electrodinámica de cuerpos en movimiento que utiliza una modificación de la doctrina de espacio y tiempo; la parte puramente cinemática de este trabajo te interesará ciertamente."



Los tres miembros de la Academia Olimpia de Berna: Conrad Habicht, Maurice Solovine y Albert Einstein. En sus serias veladas filosóficas se leyeron y discutieron fundamentalmente textos de David Hume y Ernst Mach

Esta impresionante producción científica, prolongada en una treintena de artículos publicados durante su estancia en Suiza, posibilitará a Einstein una verdadera escalada en su carrera de investigador. Siguiendo el consejo de sus amigos, comenzará por inscribirse como "Privatdozent" en la Universidad de Berna, donde durante el curso 1908-1909 impartirá un semestre de "Teoría molecular del calor" y otro de "Teoría de la radiación", a tres y cuatro alumnos, respectivamente. Este requisito bastaba para que la Universidad de Zürich pudiera invitarle como "profesor extraordinario", durante el curso 1909-1910. En los cursos 1910-1912 ocupó la prestigiosa cátedra de Física Teórica de la Universidad de lengua alemana en Praga, donde florecía la física y la filosofía de la escuela de Mach. El curso 1912-1913 volverá a Suiza, solicitado con todos los honores como profesor del Politécnico de Zürich, allí donde pocos años antes había suspendido el examen de ingreso. En 1913 concluirá su estancia en Suiza, al ofrecérsele en Berlín un puesto importante en el Instituto de Investigación recientemente fundado por el Emperador Guillermo. La fama mundial de Einstein se debe a las comprobaciones astronómicas de la relatividad general, realizadas por Eddington durante un eclipse de sol, y presentadas a la Royal Society de Londres como una superación de la mecánica newtoniana. Toda esa carrera científica tiene su base en los trabajos realizados durante su estancia en Suiza. Cuando en 1922 se le conceda el Premio Nobel "por sus servicios a la Física Teórica, y especialmente por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico", se está aludiendo entre otros al primero de los artículos publicados durante el "año estelar", al que él mismo califica de "muy revolucionario". Su aportación entonces más revolucionaria y que hoy constituye uno de los "dogmas" de la física teórica, lo constituye la relatividad especial, formulada por primera vez en el cuarto de esos trabajos. Si, retrocediendo algunos de estos años de Berna, se quiere rastrear la génesis de esa revolucionaria "modificación de la doctrina de espacio y tiempo", que forma el núcleo de la relatividd especial de Einstein, es imprescindible conocer su reflexión filosófica en el cuadro juvenil de la "Academia Olimpia de Berna". Esta constaba de tres miembros: Albert Einstein, Maurice Solovine y Conrad Habicht, que acabamos de citar. Solovine era otro estudiante de la Universidad de Berna, de origen rumano, matriculado a la vez de literatura, filosofía griega, fisiología médica, geología, matemáticas y física experimental. Buscando un profesor particular de estas dos últimas asignaturas, tropezó con un anuncio de periódico en que un tal Albert Einstein, antiguo alumno del Politécnico de Zürich, ofrecía clases particulares

ANNALEN

DER

PHYSIK.

BEGRÜNDET UND FORTGEFÜHRT DURCH

F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. UND E. WIEDEMANN.

VIERTE FOLGE.

BAND 17.

DER GANZEN REIHE 322. BAND.

KURATORIUM:

F. KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE, W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG.

UNTER MITWIRKUNG

DER DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

UND INSBESONDERE VON

M. PLANCK

HERAUSGEGEBEN VON

PAUL DRUDE.

MIT FÜNF FIGURENTAFELN.



LEIPZIG, 1905.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.

Portada del volumen 17 de "Anales de Física", la prestigiosa revista de la Sociedad Alemana de Física, dirigida por Max Planck. Este volumen contiene tres de los más famosos trabajos de Einstein: "Sobre un punto de vista eurístico, relativo a la producción y transformación de la luz" (introducción del fotón), "Sobre el movimiento de partículas en suspensión, debido a la teoría cinética molecular del calor" (interpretación del movimiento browniano), y "Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento" (introducción de la relatividad especial)

de física teórica a tres francos la hora (era la época en que Einstein aguardaba con impaciencia su colocación en la oficina de patentes). Parece que las clases particulares no se llegaron a dar, pero la amistad y el diálogo filosófico crecieron muy deprisa. Muchos años más tarde, Einstein le recordará "nuestra divertida academia, que era en realidad menos infantil que las respetables Academias que he ido conociendo de cerca más tarde". Sus sesiones vespertinas tenían lugar en la habitación de uno u otro de los tres miembros, y se combinaban con una cena muy frugal. En ellas se leyeron y comentaron, entre otros textos filosóficos, "La mecánica, presentada en su desarrollo histórico-crítico" de Ernst Mach, y "Un tratado de la naturaleza humana" de David Hume. La seriedad de la asistencia a sus sesiones se refleja en una anécdota, familiarmente conservada. Solovine propuso suprimir una sesión, para que los tres pudieran asistir a un concierto en el que se anunciaban cuartetos de Beethoven, Smetana y Dvorak. Einstein replicó: "Me parece mejor renunciar al concierto y continuar nuestra lectura de Hume, que resulta tan interesante". Y la decisión fue aceptada por mayoría. Pero Solovine en el último momento cayó en la tentación de irse él solo al concierto. La sesión debía tener lugar en su propia habitación. Para suavizar la situación, añadió al menú ordinario cuatro huevos duros, sobre los que colocó una inscripción latina: "amicis carissimis, ova dura et salutem". En venganza los otros dos miembros le dejarán la habitación totalmente revuelta y, Einstein con su pipa y Habicht con su puro, se esforzarán por llenarla de humo bien espeso. Sobre la pared colocarán la inscripción: "amico carissimo, fumum spissum et salutem".

Además de la Academia Olimpia, una ocasión de diálogo filosófico durante estos años de Berna la constituyen los paseos a la salida de la oficina de patentes en compañía de Michele Besso, antiguo compañero de estudios, convertido en compañero de trabajo. Einstein le cita al fin de su artículo sobre la relatividad, agradeciéndole "su fiel compañía y sus valiosas sugerencias durante la elaboración de esos problemas".

Según la autobiografía de Einstein, ese enfoque filosófico era fundamental para atacar la paradoja de la constancia de la velocidad y la invariancia por traslaciones de las ecuaciones de Maxwell, paradoja que estaba ya implícita en su problema de Aarau: "Todos los intentos de aclarar satisfactoriamente esa paradoja estaban condenados al fracaso, mientras estuviera anclado en nuestro inconsciente, sin nosotros caer en la cuenta, el axioma del carácter absoluto del tiempo o de la simultaneidad. Caer claramente en la cuenta de este axioma y de su carácter arbitrario, significa ya en realidad resolver el problema. El tipo de pensamiento crítico, necesario para descubrir este punto central, fue avivado en mí de modo decisivo gracias a la lectura de los escritos filosóficos de David Hume y Ernst Mach." Como confesará el mismo Einstein en 1948, contestando a una carta de su fiel amigo Besso, "la influencia de Mach sobre la evolución de mi pensamiento ha sido ciertamente muy grande. Recuerdo muy bien que tú me diste a conocer su mecánica y su teoría del calor durante mis primeros años de estudiante, y que ambos libros me produjeron una gran impresión... El gran mérito de Mach es haber socavado el dogmatismo que dominaba en los siglos XVIII y XIX sobre los fundamentos de la física... Ha defendido con convicción el punto de vista de que los conceptos [físicos], aun los más fundamentales, reciben su justificación únicamente de la experiencia, y de que no son en modo alguno *lógicamente* necesarios." La primera parte del artículo de Einstein trasluce ese esfuerzo positivista al analizar el concepto de tiempo, al referirlo al proceso de medida, al reducir el mundo físico a un conjunto de sucesos puntuales... Einstein se creerá discípulo de Mach, y el naciente Círculo de Viena presentará la relatividad como un triunfo de su concepción positivista.

Pero en realidad el positivismo de Einstein era mucho más especulativo que el de Mach, y lo será cada vez más. Le hará caer en la cuenta de su divergencia el hecho de que Mach rechazara al fin de su vida la teoría de la relatividad, "porque –según comenta Einstein– le parecía sobrepasar en especulación todos los límites permitidos. No caía en la cuenta de que este carácter especulativo lo tiene también la mecánica de Newton, y en general toda teoría imaginable... Creía más o menos que la ciencia consiste únicamente en poner orden en el material experimental; es decir, ha desconocido el elemento constructivo libre en la elaboración de las nociones. Ha creído en cierto modo que las teorías son el resultado de un *descubrimiento* y no de una *invención*. Ha llegado incluso a considerar las sensaciones... como los materiales de construcción del mundo real".

Esta ciencia einsteniana, con su creación especulativa y su comprobación experimental, debe producir una maravilla siempre creciente ante el misterio de la comprehensibilidad del universo. En una carta de 1952 a Solovine, su antiguo compañero de la Academia Olimpia, lo expresará de forma afortunada: "Consideras extraño que conciba la comprehensibilidad del mundo... como maravilla o misterio eterno. Pues bien, a priori debería esperarse un mundo caótico... Debería esperarse que el mundo se muestre sujeto a ley, únicamente en cuanto nosotros intervengamos poniendo orden en él. Sería un tipo de ordenación como la ordenación alfabética de las palabras de una lengua. Por el contrario, el tipo de ordenación que produce la teoría de la gravitación de Newton, por ejemplo, es de un carácter totalmente diferente. Aunque los axiomas de la teoría estén puestos por el hombre, el éxito de tal empresa presupone un alto nivel de ordenación en el mundo objetivo, que a priori no tenemos ningún derecho a esperar. Ahí está "la maravilla", que crece continuamente con el desarrollo de nuestro conocimiento. Ahí está el punto débil de los positivistas y ateos profesionales, que se sienten felices en su conciencia de haber no sólo desdivinizado con éxito el mundo, sino incluso de haberlo desmaravillado."

En este sentimiento de admiración ante una armonía del universo que apenas rastreamos por el arte y por las ciencias, basa

Einstein lo que él considera su "religiosidad cósmica". En ella se apoya la vida y el esfuerzo del investigador.

Con ocasión de los cien años del nacimiento de Albert Einstein, entre una celebración en Princeton y otra en Jerusalén, ha tenido lugar otra gran celebración en Berna, los días 12 a 17 de marzo. En ella han presentado conferencias científicas sobre la relatividad y la cosmología: C. N. Yang, J. A. Wheeler, D. W. Sciama y J. Geiss. Han tratado problemas filosóficos de la ciencia: B. d'Espagnat, E. Agazzi y K. Hübner. Sobre la ciencia en relación al arte, a la sociedad y a la paz, hablaron V. Weisskopf y E. L. Feinberg, A. R. Kaddoura y H. M. Sass, y J. Galtung. El tema de "Dios y el mundo contingente" fue tratado por el Rev. T. Torrance. Como representante español, el Prof. P. Laín Entralgo disertó sobre "El hombre y su necesidad de energía, de alimento y de amor". La tarde del mismo día del centenario, el 14 de marzo, tuvo lugar una especial ceremonia conmemorativa en el Casino de Berna, en la que, entre solos de violín de Bach, se recordó la personalidad de Einstein, y se entregó la medalla Albert Einstein al profesor Stephen William Hawking, de la Universidad de Cambridge, por sus trabajos de relatividad general relacionados con los agujeros negros. Es una primera iniciativa de la Sociedad Albert Einstein de Berna, que tiene también entre sus finalidades conservar y dar a conocer documentos de Einstein y establecer un pequeño museo en la vivienda de Kramgasse 49, en donde redactó el primer artículo sobre la relatividad.

Los dinosaurios eran de sangre fría

Los anillos de crecimiento anual suelen darse en tejidos esqueléticos de vertebrados ectotérmicos (de sangre fría), recientes y fósiles. La formación de esos dibujos anulares se atribuye comúnmente a la incapacidad de los ectotermos para mantener elevados niveles de actividad, alimentarse y crecer durante épocas adversas, como son las estaciones de sequía en las zonas tropicales y las estaciones frías en latitudes más altas y moderadas. En los vertebrados endotermos, sin embargo, la producción eficaz de calor endógeno resulta de una temperatura corporal relativamente constante, y pueden mantenerse sin mayores complicaciones una elevada actividad y altos niveles de alimentación. Lo cual implica que el desarrollo de los tejidos esqueléticos de estos animales sean menos sensibles a las variaciones estacionales que lo puedan ser los mismos tejidos en los ectodermos; de ahí que son muy raras las especies endotérmicas que presentan formaciones anulares, y, cuando ello se da, ocurre en las que están sometidas a unos regímenes estacionales muy extremados.

En el número de abril de 1975 de *Scientific American,* Robert T. Bakker tras explicar meridianamente las características de la ectodermia y la endotermia de los vertebrados concluía que los dinosaurios constituían un grupo nuevo de animales de sangre caliente, cuyos descendientes eran las aves. Pero acaba de publicarse en *Nature* (12 de abril de 1979) el resultado de una investigación sobre los dientes de dicho grupo taxonómico en que se descubre que, por observarse anulaciones en dicha formación esquelética de dinosaurios del cretácico tardío, éstos eran ectodérmicos, de sangre fría.

Paul A.Johnston, a quien se debe tal hallazgo, ha recuperado cientos de dientes de dinosaurios procedentes de las formaciones continentales de Milk River, Oldman y Edmonton, de Alberta (Canadá), y pertenecientes a los grupos zoológicos de los Saurischia y Ornithischia. Todos portan, muy bien definidos, anillos en la dentina. Estas líneas anulares son de dos tipos principales: líneas de contorno de Owen, que en las especies recientes marcan pequeñas variaciones nutricionales y metabólicas durante la deposición de dentina y que se van acentuando según el grado de alteración sufrida, y anillos mayores, que se caracterizan por una banda estrecha e hipercalcificada (crecimiento invernal) y una banda hipocalcificada más ancha, producidas por la variación estacional en la tasa de crecimiento del estroma orgánico de la dentina. Ambas bandas constituyen una capa anual. Por consiguiente, desde el punto de vista histológico, la estructura de la dentina de los dinosaurios señala una periocidad en su desarrollo.

Los únicos endotermos terrestres vivos, sigue Johnston, cuya dentina registra anillos tan netos como los de los dinosaurios de Alberta son los mamíferos de las regiones árticas o templadas sometidos a fuertes contrastes estacionales. Pero no parece que haya habido un clima extremado en Alberta durante el cretácico tardío; antes bien, las pruebas paleontológicas y paleobotánicas nos hablan de un clima cálido, subtropical. Parece, pues, verosímil pensar que los dinosaurios eran ectotérmicos, sensibles por tanto a cambios de temperatura suavemente moderados. Los endotermos de un tamaño corporal relevante no habían hecho todavía acto de presencia en el cretácico tardío. Y los micromamíferos endotérmicos de esa época carecen de anillos en la dentina. Los mamíferos del Terciario tienen dientes con líneas de Owen dibujadas, pero no muestran las bandas anuales o están pobremente sugeridas.



La arcilla

Sus múltiples aplicaciones se deben a que está constituida por finas partículas que son un reflejo de la naturaleza de sus minerales. Estos minerales se forman, se destruyen y se vuelven a constituir, siguiendo un largo ciclo geológico

Georges Millot

La corteza terrestre está constituida por rocas, que en su mayor parte se hallan recubiertas por las pequeñas partículas resultantes de su descomposición. El suelo está formado por materia orgánica y estas partículas, las cuales se pueden dividir de un modo general, según su tamaño, en arena, limo y arcilla. Todas ellas son abundantes y tienen una distribución amplia, por lo que una muestra cualquiera de suelo contendrá probablemente una mezcla de las mismas. Las partículas más finas son las de la arcilla, cuyo tamaño se halla estrechamente relacionado con las propiedades de sus minerales constituyentes. Y así ocurre que, debido fundamentalmente a esas propiedades, las arcillas desempeñan un papel único tanto en lo que se refiere a los procesos geológicos como en lo concerniente a la actividad humana.

Para el científico dedicado al estudio de la tierra, las arcillas no son sólo las partículas y agregados de partículas, sino también rocas constituidas por los denominados minerales de la arcilla. Estos últimos son cristales de silicato de dimensiones tan pequeñas que es mejor considerarlos microcristales. Con todo, tienen la estructura perfecta, o casi perfecta, de los cristales.

En la mayoría de rocas se pueden observar nítidamente los cristales de los minerales integrantes. Así, por ejemplo, en un trozo de granito se pueden distinguir a simple vista cristales de cuarzo, feldespato y mica. Sin embargo, los cristales de minerales de la arcilla son tan diminutos (la mayoría no alcanzan los dos micrometros de longitud) que el ojo solo no los aprecia ni siquiera con la ayuda de una lupa. Hasta que pudieron utilizarse las técnicas de difracción de rayos X, análisis térmico diferencial y microscopía electrónica no se logró separar, identificar y estudiar los minerales de la arcilla.

Gracias a la aplicación de estas técnicas, podemos hoy distinguir, con gran provecho, entre minerales de la arcilla y las arcillas propiamente dichas. Los primeros son los minerales característicos que las componen, mientras que estas últimas son rocas en las que los minerales de la arcilla se hallan mezclados en proporciones variadas (pudiendo intervenir también en la mezcla, arena, carbonato cálcico y óxidos de hierro), que nos dan la gran diversidad de arcillas naturales. Así pues, el término arcilla encierra cuatro acepciones diferentes según se refiera al tamaño de las partículas, a los minerales, a las rocas o a su uso más corriente y extendido como material plástico.

Los minerales de la arcilla

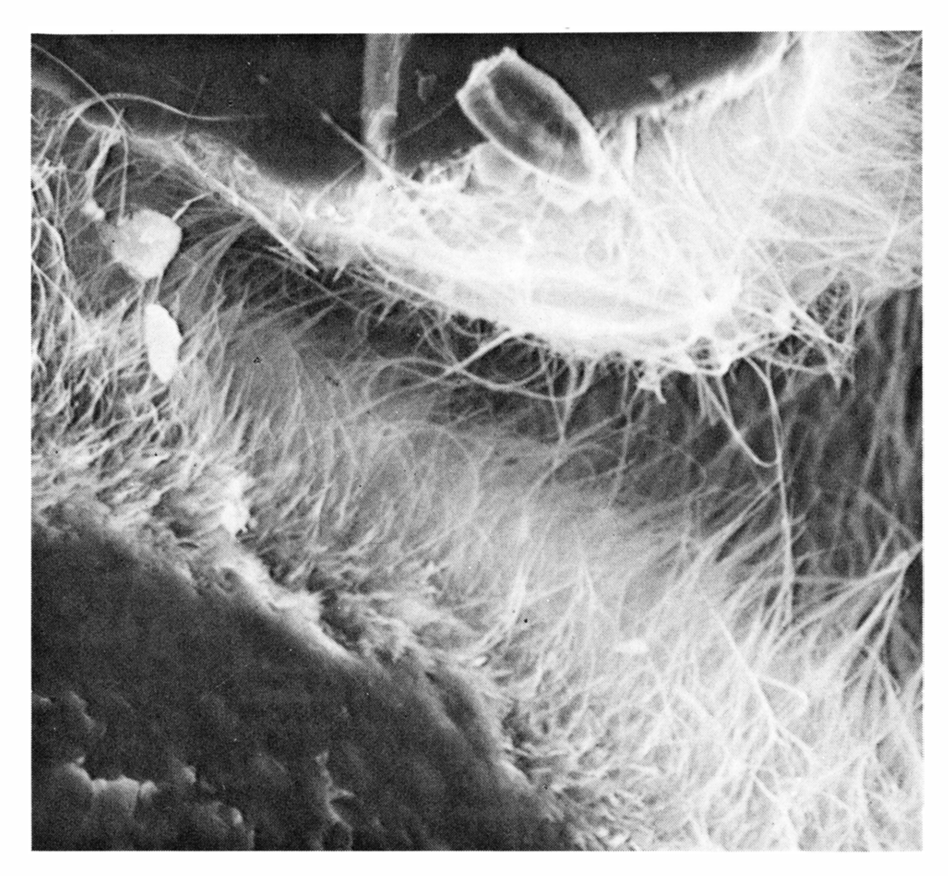
En un mineral de la arcilla los elementos oxígeno, silicio, aluminio, hierro, magnesio y potasio (que se encuentran en estado iónico, es decir, tienen como mínimo un electrón más, o un electrón menos, que el átomo no ionizado, poseyendo, por tanto, carga eléctrica) son esferas dispuestas tridimensionalmente y de forma regular. Las esferas son los bloques constituyentes de los minerales de la arcilla, y la disposición de los mismos determina el tipo de mineral. Cada tipo de "disposición" constituye un grupo de minerales de la arcilla, admitiéndose, en general, la existencia de siete de estos grupos. Debe tenerse en cuenta que en cada grupo básico un elemento típico puede ser substituido parcialmente por otro elemento. Por ejemplo, el aluminio podría substituir al silicio, o el magnesio hacer lo propio con el aluminio. Este tipo de substitución produce las diferentes especies minerales de la arcilla de las cuales se conocen unas cincuenta. Seis de los siete grupos de minerales de la arcilla se componen de silicatos laminares o en capas (de ahí su denominación de filosilicatos, del griego *phyllon,* hoja). Los minerales del grupo séptimo adquieren forma de bandas.

El grupo del caolín, en el que se encuadran las arcillas blancas, útiles (entre otras muchas aplicaciones) para la fabricación de porcelana y para dar blancura y gramaje al papel, recibe este nombre de una colina de China de donde se extrajo arcilla blanca durante siglos. La especie principal del grupo es la caolinita, un silicato laminar. Las micrografías de caolinita realizadas con el microscopio electrónico muestran a menudo escamas hexagonales bien formadas, cada una de las cuales está constituida por capas. La difracción de rayos X da un valor de siete angstrom (un angstrom equivale a una diezmillonésima de milímetro) para la distancia entre capas consecutivas. La fórmula química de la caolinita es $2SiO_2$, Al_2O_3, $2H_2O$. Así pues, la caolinita es exclusivamente silicoaluminosa.

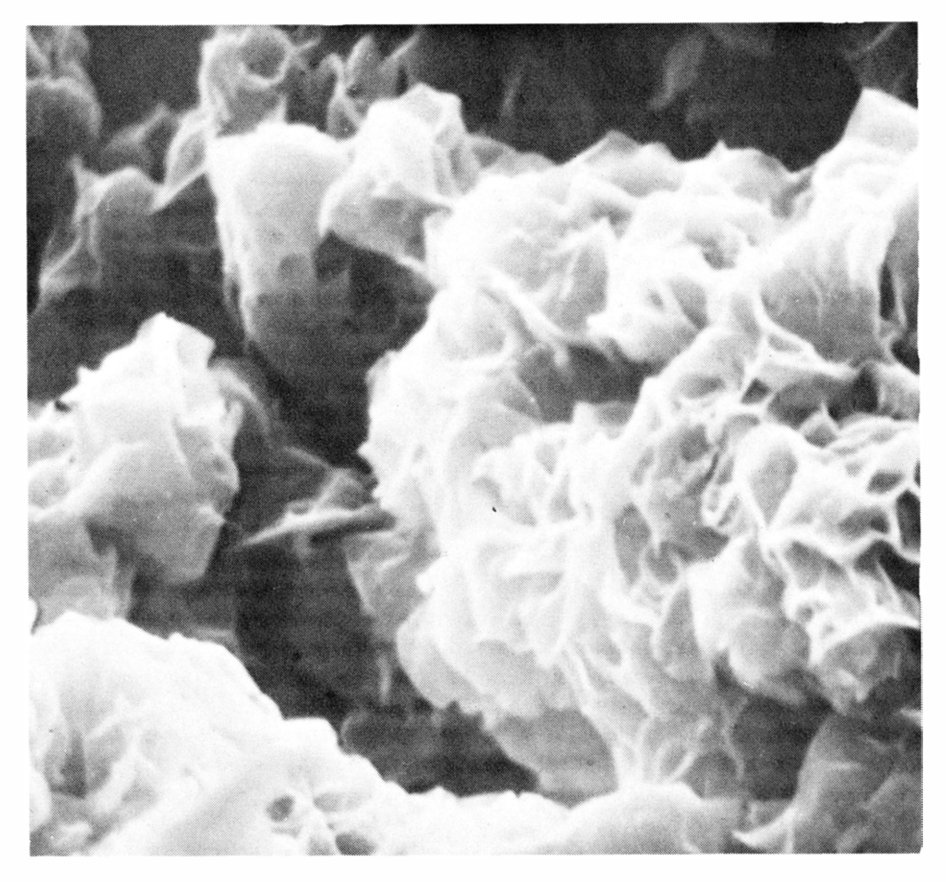
En el grupo del caolín se pueden distinguir unas diez especies. La más corriente de ellas, después de la caolinita, es la halloysita. Sus capas están separadas entre sí por láminas de agua combinada químicamente y las escamas son tan delgadas que se enrollan frecuentemente para configurar una suerte de tubos. Las otras especies se caracterizan por la substitución parcial de aluminio por hierro, magnesio, níquel o manganeso.

El grupo de la illita recibe este nombre del estado de Illinois. Entre los minerales de la arcilla en estado natural los de la illita son los más frecuentes. Tienen la

MINERAL DE LA ARCILLA mostrado en la micrografía de la página opuesta, realizada con microscopio electrónico de barrido. Se trata del mineral dickita, una variedad de caolín, que presenta "libros" hexagonales, o escamas bien desarrolladas constituida cada una de ellas por capas dispuestas a modo de hojas. Este ejemplar se observa a 15.000 aumentos. La micrografía fue tomada por W. D. Keller.



BANDAS DE ILLITA, a 1500 aumentos en una micrografía realizada con microscopio electrónico de barrido. Se originaron en los poros de una arenisca de Mississippi. La illita es uno de los minerales de la arcilla más frecuentes, si bien es más probable que se presente en forma de escamas que en forma de bandas barbadas. Esta micrografía ha sido cedida por Necip Güven, de la Texas Tech University.



GRUPO DE LA ESMECTITA, minerales de la arcilla que antes recibían el nombre de grupo de la montmorillonita. Dicha clase está constituida por cristales extraordinariamente pequeños, irregulares y en capas finas. Esta micrografía de microscopio electrónico de barrido tiene 15.000 aumentos.

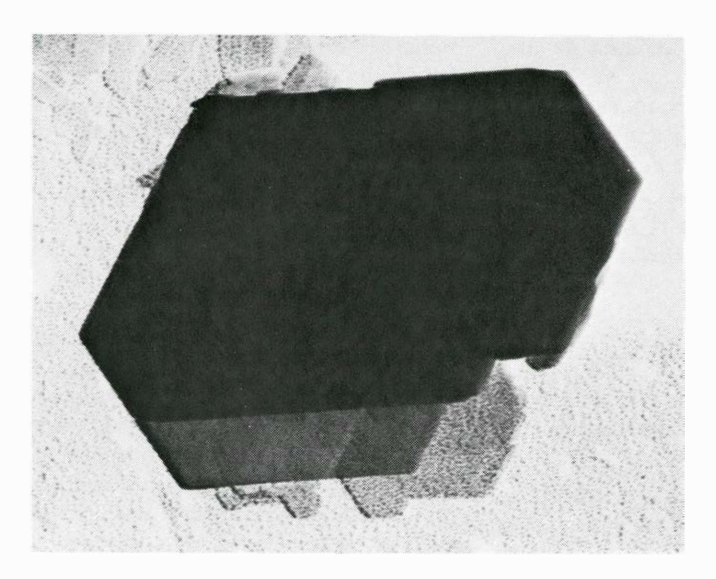
estructura de micas microscópicas compuestas de escamas que muestran, al microscopio electrónico, contornos irregulares. La distancia entre capas consecutivas es de 10 angstrom. Las capas se enlazan entre sí mediante átomos de potasio. La fórmula química de la illita es parecida a la de la mica blanca, pero la primera contiene más agua y menos potasio. La otra especie más conocida del grupo es la glauconita, que contiene hierro en vez de aluminio. Este mineral de color verde se encuentra típicamente asociado con arcillas de origen marino.

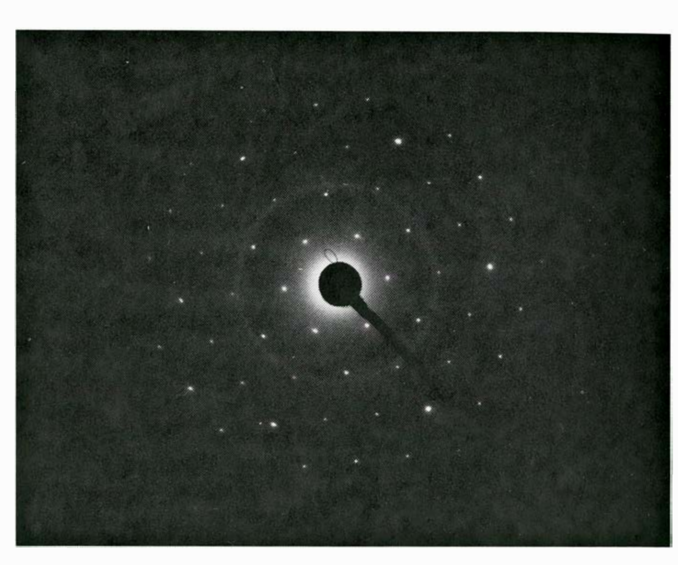
El tercer grupo se llamaba, hasta hace poco, grupo de la montmorillonita, nombre que proviene de la ciudad de Montmorillon (Francia), pero hoy en día se le conoce también con el nombre de grupo de la esmectita, denominación que alude a su estructura en capas. Sus microcristales tienen dimensiones muy pequeñas, forman láminas muy delgadas y carecen de contornos regulares. Las capas o láminas no están unidas entre sí por un enlace muy fuerte; ello explica que el agua, numerosos elementos y hasta la materia orgánica puedan penetrar por los espacios existentes entre las capas. Consiguientemente, la distancia entre las capas puede variar entre 10 y 17,5 angstrom, lo cual da a las esmectitas unas propiedades de absorción y adsorción muy estimadas por la industria. La especie de esmectita más familiar es la montmorillonita. Especies afines son la beidellita (en la cual el silicio está parcialmente substituido por aluminio), la nontronita (aluminio parcialmente substituido por hierro), la saponita y la stevensita (aluminio parcialmente substituido por magnesio).

Viene, a continuación, el grupo de la clorita, cuyo nombre deriva del griego *chloros,* verde amarillento claro. Este grupo abarca gran variedad de especies, cada una de las cuales se forma a partir de la sustitución de un elemento por otro en la estructura cristalina. La proximidad de las capas se debe a los enlaces de los iones de magnesio, aluminio y hierro hidratos, siendo de 14 angstrom la distancia entre dos estratos consecutivos.

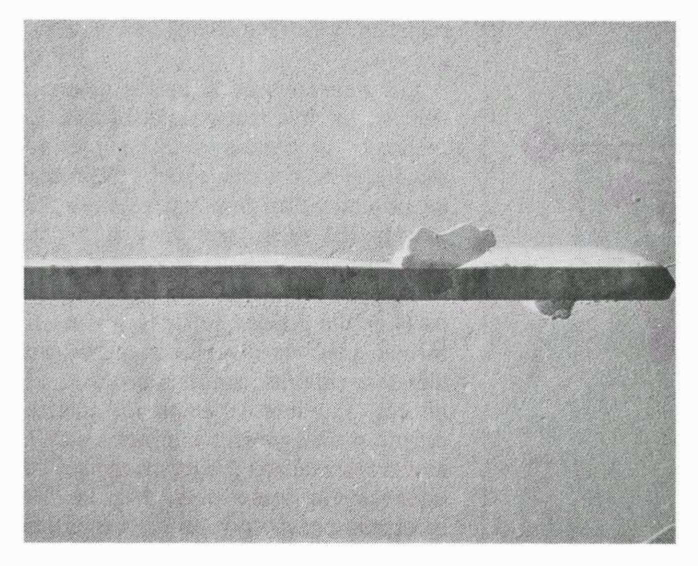
El término vermiculita, nombre que recibe el quinto grupo, procede de la tendencia de estos minerales de la arcilla, cuando son calentados, a adquirir el aspecto de gusanos diminutos. (*Vermiculus,* en latín, significa gusano pequeño.) En las vermiculitas de la arcilla la distancia entre capas consecutivas es de 14 angstrom pero el agua existente entre ellas puede eliminarse por calentamiento, de tal manera que la distancia baja bruscamente a 10 angstrom.

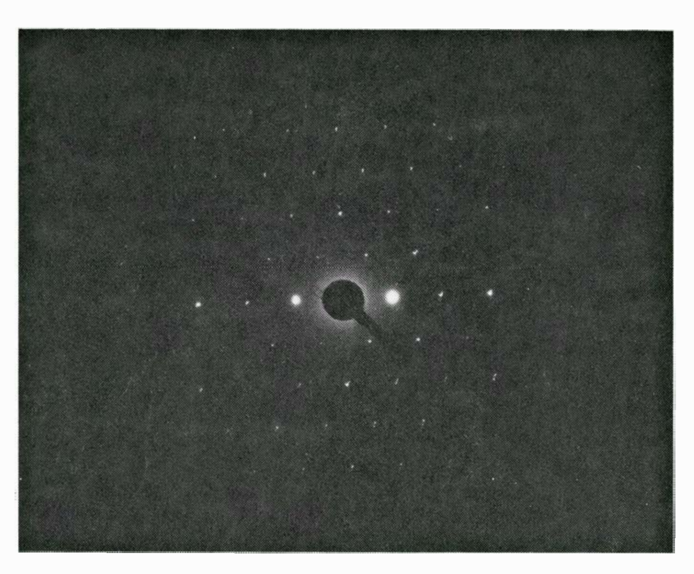
El grupo de minerales de la arcilla



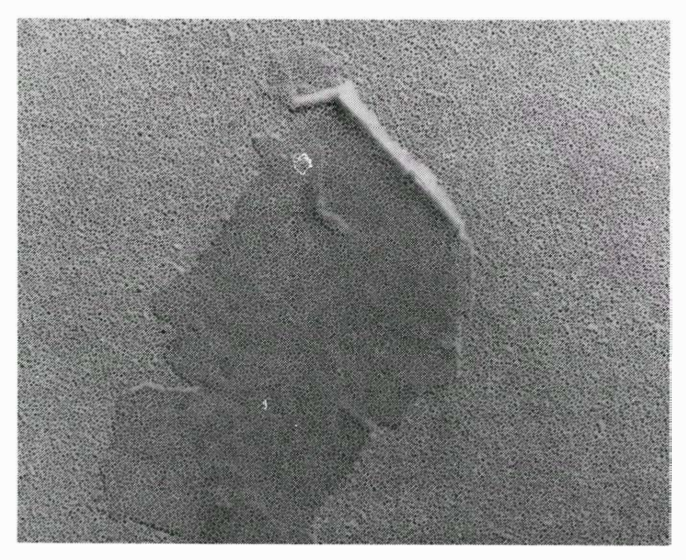


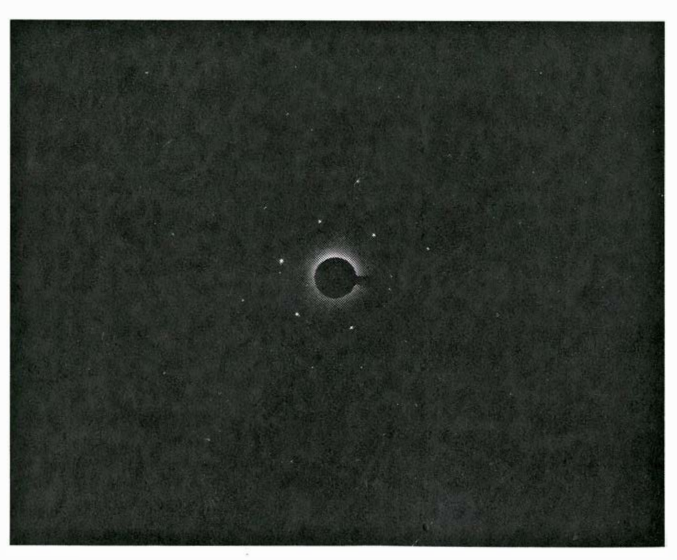
CRISTAL DE CAOLINITA a 64.000 aumentos en una micrografía electrónica de transmisión (*izquierda*). La difracción electrónica realizada en una zona seleccionada del cristal nos da la disposición que se observa a la derecha. Los puntos claros de la figura de difracción se produjeron cuando los átomos del cristal dispersaron un haz de electrones. Estos puntos demuestran la disposición regular de los átomos en la estructura cristalina. El interceptor del haz, que es una parte del aparato, es responsable del disco obscuro central. Las fotografías de esta página son de Necip Güven.





BANDA DE ILLITA en una micrografía electrónica de transmisión de 15.000 aumentos, y en una figura de difracción realizada en una zona seleccionada. La simetría hexagonal de los puntos claros (*derecha*) refleja la disposición hexagonal de los átomos en la estructura cristalina.





ESCAMA DE MONTMORILLONITA, mineral que forma parte del grupo de la esmectita. A la izquierda aparece en una micrografía electrónica de transmisión a 60.000 aumentos. Su estructura cristalina puede verse en la figura de difracción de una zona seleccionada del cristal.

denominado interestratificado está constituido por una considerable variedad de formas intermedias de los cinco grupos recién descritos. Mediante difracción de rayos X se puede determinar si la distancia entre capas, en una especie dada, alterna regularmente o es irregular, a través de estados de equilibrio muy inestables que son etapas de la evolución de un mineral a otro.

El grupo formado por bandas tiene un nombre doble: de la sepiolita y attapulgita. Sepiolita es una denominación antigua de origen griego y en algunos sitios es sinónimo de espuma de mar. Las arcillas de este grupo se emplean para fabricar pipas de espuma de mar. El nombre de attapulgita proviene de Attapulgus (estado de Georgia) donde se encuentran arcillas de este tipo. Los minerales que forman el grupo contienen cantidades relativamente grandes de magnesio.

El ciclo geológico

En los siete grupos se encuentran unos 15 minerales predominantes. Los minerales de la arcilla no se encuentran en las rocas que constituyen la parte profunda de la corteza terrestre, pero sí abundan en superficie. La razón de este contraste reside en el ciclo que sufren las rocas a través de una serie de procesos geológicos.

El ciclo se desarrolla en cinco etapas. Las rocas profundas de la corteza suben a la superficie en virtud de la acción volcánica y los procesos de plegamiento y fracturación que edifican las cadenas de montañas. En superficie, las rocas sufren meteorización y erosión. Los productos resultantes son transportados (sobre todo por el agua) a grandes distancias, depositándose finalmente en cuencas sedimentarias. Los sedimentos se van enterrando lentamente y transformando en rocas a través del proceso denominado diagénesis. Estas rocas sedimentarias sufren procesos de metamorfismo y granitización que las transforman en última instancia en gneis y granito.

Los minerales de la arcilla aparecen sólo en las tres etapas intermedias. En realidad, la génesis principal de los minerales de la arcilla se debe al proceso de meteorización responsable de la formación del suelo, que tiene lugar durante la segunda de las cinco etapas. En la etapa de sedimentación, los minerales de la arcilla pueden sufrir ligeras transformaciones, de diversas maneras, pudiéndose producir algunos procesos genéticos. Durante la etapa de enterramiento y diagénesis, los minerales de la arcilla recristalizan progresivamente, desapareciendo como tales. Así, la illita incorpora potasio y vuelve a convertirse en mica.

La meteorización comprende dos procesos principales: fragmentación e hidrólisis. La fragmentación es la desintegración de rocas y minerales primarios a través de mecanismos alternantes: humedecimiento y desecación, helada y deshielo; se produce también por cristalización de sales. La hidrólisis supone una reacción lenta de los minerales primarios con el agua, formando nuevos minerales. El proceso se acelera y es controlado también en gran parte por la materia orgánica producida por la vegetación. Como cabe esperar, la actividad de la hidrólisis aumenta con la temperatura y la pluviosidad.

La meteorización de las rocas varía considerablemente según el clima de la zona donde éstas se encuentren. En las regiones frías y montañosas la hidrólisis es mínima. El agua tiende a no circular, por causa de las heladas, y la vegetación escasea o falta. Domina el proceso de fragmentación, lo que determina que los

ESTRUCTURA ATOMICA de la mayoría de los minerales de la arcilla. Consiste en tetraedros de sílice y octaedros de alúmina. Un tetraedro de sílice (*a*) tiene un átomo de silicio equidistante de cuatro oxígenos u oxidrilos (OH). Los tetraedros están dispuestos en un retículo hexagonal de tipo laminar (*b*), compartiendo los átomos de oxígeno de los vértices basales de los tetraedros. (Esta disposición hexagonal se refleja en la simetría de los puntos brillantes de los diagramas de difracción.) En la unidad octaédrica (*c*) un átomo de aluminio, hierro o magnesio equidista de seis oxígenos u oxidrilos. Estas unidades forman unas capas laminares (*d*) compartiendo oxígenos entre octaedros adyacentes. La repetición bidimensional de las unidades tetraédricas y octaédricas y el apilamiento de estas láminas según varias combinaciones originan la forma en escamas de gran parte de los minerales de la arcilla.

únicos minerales de la arcilla formados estén compuestos de micas primarias, desintegradas y ligeramente alteradas, y de cloritas.

La hidrólisis actúa muy poco, asimismo, en los desiertos. La temperatura es elevada, pero el agua escasea, lo cual hace que la meteorización química sea de poca importancia.

En las regiones templadas tanto la fragmentación como la hidrólisis son activas. Los principales minerales meteorizados son las micas primarias y las cloritas, las cuales producen minerales de la arcilla como las illitas y cloritas. Si la meteorización continúa, se eliminan los iones más solubles y se substituyen los minerales originales por estructuras cada vez más degradadas, como las correspondientes a las vermiculitas y a los minerales interestratificados

La hidrólisis actúa en toda su intensidad en las regiones tropicales que poseen estaciones húmedas y secas, alternas. Los elementos son eliminados de los minerales y se combinan luego de nuevo dando lugar, principalmente, a dos minerales de la arcilla: montmorillonita y caolinita. La montmorillonita se desarrolla particularmente bien en los productos meteorizados de rocas como el basalto y en zonas que posean estaciones largas y secas, o drenaje deficiente, de forma que los productos de la meteorización se hagan más ricos en sílice, álcalis y metales alcalinotérreos. Donde mejor se forma la caolinita es en los productos meteorizados de rocas como el granito, cuando su alteración tiene lugar en zonas con precipitaciones abundantes y bien drenadas donde se tiende a eliminar la sílice y los álcalis, dejando los minerales meteorizados que son relativamente ricos en aluminio.

En las regiones ecuatoriales y en las zonas tropicales húmedas la precipitación anual sobrepasa los dos metros, pudiendo alcanzar incluso los diez metros. La hidrólisis predomina debido a la gran cantidad de agua caída, a la elevada temperatura existente y al intenso lavado que se produce. Si la zona está bien drenada, la sílice y los cationes (o iones con carga positiva) solubles son eliminados de la roca, dejando los productos meteorizados relativamente enriquecidos en aluminio, con lo que se favorece la formación de caolinita. Pero si el drenaje resulta todavía más eficaz, o el proceso prolonga su duración, llega a eliminarse aún más sílice permaneciendo la alúmina, con lo que se forma gibbsita, mineral con aluminio.

Por decirlo de otro modo, podemos considerar la génesis de los minerales de la arcilla cual si se tratara de un gigantesco proceso de substracción. La lluvia lava y disuelve las rocas arrastrando los elementos en ellas contenidos de acuerdo con su solubilidad: sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro, silicio y aluminio. Los elementos que permanecen se combinan para dar los minerales de la arcilla. Un lavado moderado produce los minerales interestratificados y las vermiculitas de los países atlánticos. Un lavado más intenso deja aún en su sitio algo de silicio, hierro y magnesio produciendo las esmectitas de los países mediterráneos y de las zonas tropicales semihúmedas. Un lavado muy intenso produce caolinita y, en última instancia, gibbsita.

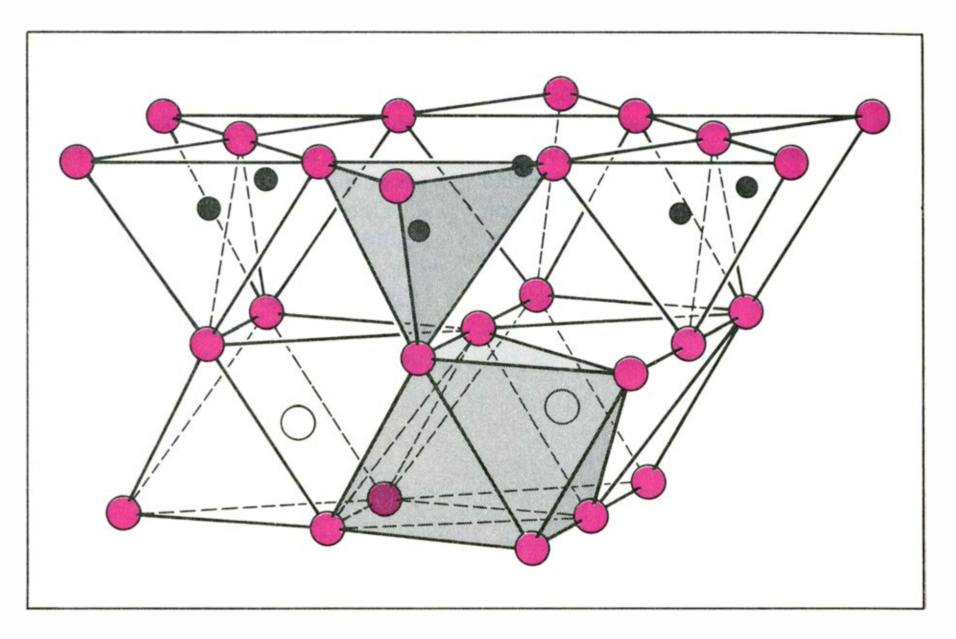
La superficie terrestre es, pues, una enorme fábrica que produce minerales de la arcilla. Sin embargo, esos minerales difieren según las zonas climáticas. Los caolines tienden a aparecer en una banda alrededor del ecuador, las esmectitas en las zonas mediterráneas y tropicales con contrastes estacionales, los minerales de la arcilla interestratificados y las vermiculitas en las zonas templadas y las illitas y cloritas en las regiones frías. Las zonas tienen bordes sinuosos según los efectos producidos por los océanos, los climas regionales, el relieve topográfico y la composición de la roca madre. De todos modos, es válido el concepto de zonas de minerales basado en el clima.

Efectos de la sedimentación

La erosión ataca el suelo y los productos de la meteorización. Cada año, los cursos de agua se llevan de los continentes miles de millones de toneladas de materiales, entre los que se encuentran los minerales de la arcilla. Estos materiales se depositan en las cuencas de sedimentación, sobre todo en las oceánicas, si bien una parte importante de ellos lo hace en los lagos.

Todas las mediciones realizadas sobre el comportamiento de los minerales de la arcilla durante el proceso de transporte y sedimentación indican que son llevados a las cuencas sedimentarias sin sufrir cambios y que se depositan allí sin experimentar variación alguna. Este proceso podría recibir el nombre de herencia ya que las características de los minerales de la arcilla depositados son heredados del continente cercano.

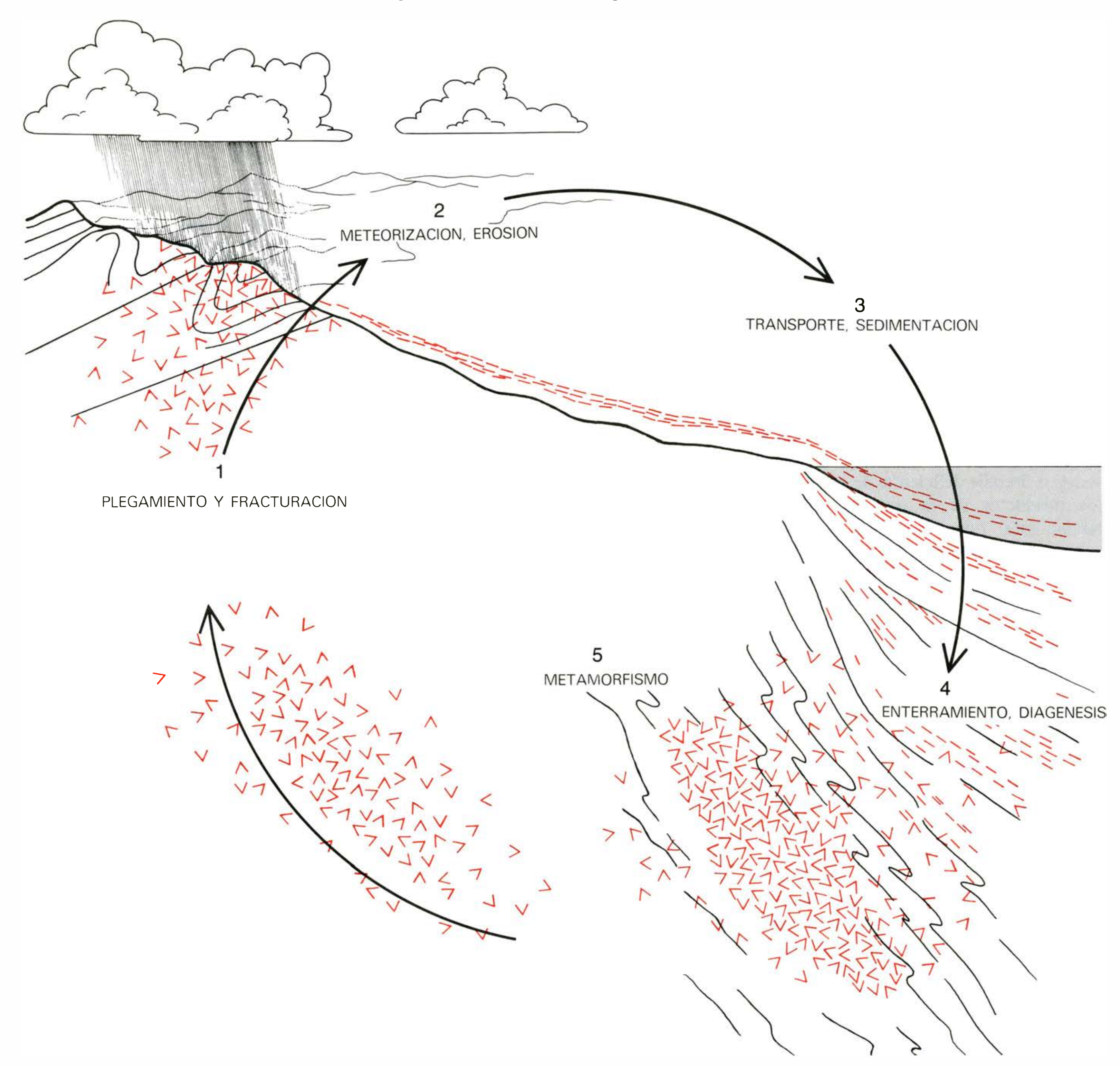
Los sedimentos oceánicos demuestran este carácter heredado. Los minerales de la arcilla proporcionan una imagen de la meteorización que los ha producido: las cloritas e illitas se encuentran en los océanos más fríos; los minerales de la arcilla interestratificados, vermiculitas y cloritas degradadas e illitas en los océanos cercanos a los continentes de la zona templada; mientras que las caolinitas se localizan cerca de las zonas tropicales y en el ecuador. Las zonas con esmectita son menos netas a excepción de las regiones donde se producen erupciones volcánicas con cenizas, las cuales se transforman frecuentemente en esmectita en el medio marino. La mineralogía de la arcilla, aplicada a las rocas sedimentarias antiguas, nos proporciona la clave para reconstruir su origen y descubrir, a veces, el tipo de clima que prevaleció cuando se formaron.



CAPA DE CAOLINITA constituida por una lámina tetraédrica y otra octaédrica. Se combinan dando una unidad, en que los extremos de los tetraedros de sílice y una de las dos láminas del agrupamiento octaédrico forman un plano común mediante oxígenos compartidos. La distancia entre la parte superior de una capa de tetraedros y octaedros y la parte superior de la capa siguiente es de siete angstrom.

Si bien en los minerales sedimentarios de la arcilla predominan sus características heredadas, existen otros procesos que pueden afectarlos. Las condiciones del medio sedimentario pueden transformarlos como sigue. En la proximidad del continente estos minerales sufrieron una degradación debido a la substracción de iones potasio, magnesio, hierro y silicio. Estos iones fueron lavados y transportados en solución hasta las cuencas sedimentarias. Cuando los minerales de la arcilla degradados llegan a una región donde existe una fuerte concentración de iones, tienden a adquirir de nuevo iones del tipo de los perdidos durante su lavado. Este proceso recibe, a veces, el nombre de fijación. Así pues, los minerales originales tienden a reconstituirse. A este proceso suele seguirle un crecimiento cristalino.

Esta clase de reconstitución puede considerarse una contrapartida de la degradación. Se trata de un proceso de adición, mientras que la degradación es un proceso de substracción. Las primeras pruebas de reconstitución fueron obtenidas en ciertos estuarios y marismas, pero los ejemplos más notables se dan en niveles triásicos de Europa y Africa, cuya edad es de unos 200 millones de años. Los minerales de la arcilla degradados fueron reconstituidos dando espléndidas cloritas magnesianas, gracias a la fijación de magnesio. De forma similar, en rocas de edad cretácica, formadas



CICLO GEOLOGICO donde se pone de manifiesto la formación de minerales de la arcilla y su posterior destrucción. Empieza (*1*) cuando las rocas de la parte profunda de la corteza terrestre suben hasta la superficie a través de procesos tectónicos tales como el plegamiento y la fracturación. En superficie, las rocas se ven sometidas a la destrucción, mecánica y química, por meteorización (*2*) pasando muchos minerales a convertirse (por eliminación selectiva de iones según su solubilidad) en los típicos minerales de la arcilla, que se representan aquí con rayas de color. Los productos de la meteorización sufren erosión; luego, son transportados por el agua principalmente hasta las cuencas sedimentarias (*3*). Allí son enterrados progresivamente. El aumento en profundidad de la presión y temperatura convierte lentamente los sedimentos en rocas. Los minerales de la arcilla se modifican durante el proceso denominado diagénesis (*4*). Los minerales transformados se representan por los símbolos en forma de *V*. La diagénesis pasa gradualmente al proceso de tipo más intenso denominado metamorfismo (*5*), durante el cual las rocas sedimentarias se transforman en esquistos y gneises. La etapa final es la granitización, durante la cual la roca y sus minerales funden completamente, cristalizando los minerales primarios. Los minerales de la arcilla han desaparecido y se han transformado en minerales primarios, listos para participar en un nuevo ciclo.

hace quizá 100 millones de años, los minerales de la arcilla degradados (esmectitas con hierro) se convirtieron en glauconitas (minerales pertenecientes al grupo de la clorita) a través de la fijación de potasio.

Durante el proceso de reconstitución se fijan en los minerales de la arcilla degradados elementos principales y secundarios. Así, por ejemplo, el boro se fija e incorpora a la red cristalina, especialmente cuando el medio es rico en sales. El análisis de estos minerales de la arcilla constituye un indicador de la salinidad del medio en que se originaron.

La neoformación es un tercer mecanismo que, si bien raro, produce minerales de la arcilla en los sedimentos. Ello supone la síntesis de nuevos minerales de la arcilla en las cuencas sedimentarias a partir de los iones de silicio, aluminio, hierro, magnesio y potasio existentes en soluciones naturales. El proceso se da en cuencas sedimentarias donde los iones se concentren por evaporación. Un buen ejemplo de ello es la sedimentación química alcalina que deposita calizas, calcedonia, fosfatos y minerales de la arcilla magnesianos entre los que se encuentran las attapulgitas, las sepiolitas y las stevensitas. En ese caso la sedimentación agrega nuevos minerales de la arcilla a los heredados.

Diagénesis y metamorfismo

Después de depositarse en el fondo de la cuenca sedimentaria los sedimentos se van enterrando, acumulándose progresiva y lentamente hasta alcanzar espesores del orden de los 4000 metros. A medida que esta acumulación continúa, y aumentan la temperatura y la presión, el agua es expulsada de los sedimentos y los barros sedimentarios se convierten en rocas sedimentarias: los barros calcáreos se convierten en calizas, las arenas pasan a areniscas y así sucesivamente. Se trata del fenómeno conocido por diagénesis.

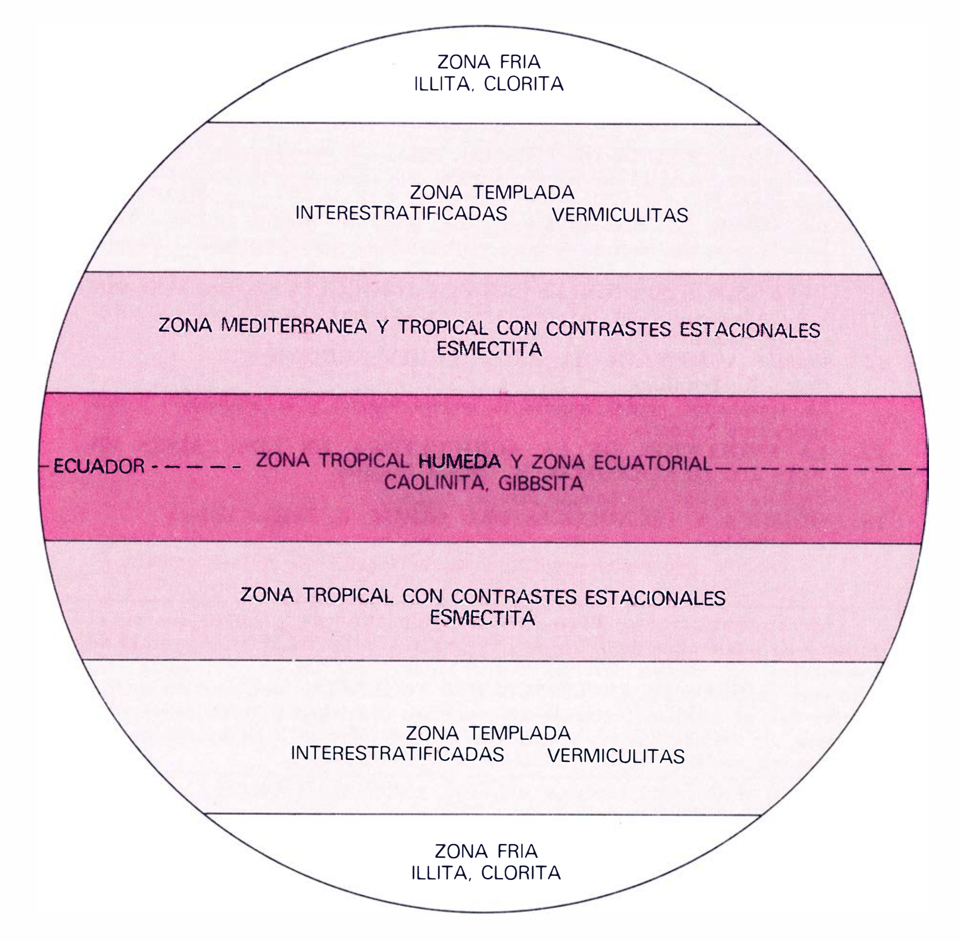
En virtud de dicha diagénesis, los limos arcillosos se convierten en limolitas y luego en limolitas laminadas. Con un posterior calentamiento y compactación, el proceso se hace metamórfico y las limolitas laminadas se convierten en pizarras, filitas y finalmente en esquistos. En el transcurso de la diagénesis inicial, durante el enterramiento, los minerales de la arcilla quedan afectados de diversas maneras. Muchos de ellos, como la vermiculita, caolinita, montmorillonita y las especies interestratificadas, empiezan a desaparecer. Por contra, la cantidad relativa de clorita e illita aumenta progresivamente. A medida que

el metamorfismo prosigue alterando las arcillas más allá de la diagénesis, los esquistos resultantes se componen de sericita y clorita. Los minerales han alcanzado casi el estadio de la mica.

Si el metamorfismo prosigue, los esquistos se convierten en micaesquistos y en gneis. Los minerales de la arcilla recristalizan dando micas y feldespatos junto con otros minerales primarios. Al final del ciclo ya no subsisten los minerales de la arcilla originarios, si bien sus precursores se encuentran en las rocas acabadas de formar y participarán en un nuevo ciclo si estas últimas suben hasta la superficie terrestre y quedan expuestas a la meteorización.

Si nos atenemos a los procesos sufridos por los minerales de la arcilla, diremos que el ciclo geológico es un ciclo geoquímico. Los minerales de la arcilla son los silicatos típicos de la parte superficial de la corteza terrestre, mientras que las rocas de las zonas profundas de esta última (graníticas y gneísicas) y algunas de las formadas en superficie (basaltos) carecen de ellos. La meteorización de la superficie induce la degradación e hidrólisis de las rocas, formando los minerales de la arcilla. En esta zona nacen dicho tipo de minerales. Los minerales de la arcilla que se sedimentan son, sobre todo, heredados; y a lo largo del proceso de sedimentación sufren una transformación de poca importancia, por reconstitución, o se forman otros nuevos. En esta zona se inicia la evolución de los minerales de la arcilla. La diagénesis actúa en los minerales de la arcilla contenidos en los sedimentos a lo largo de su enterramiento. Al aumentar la temperatura con la profundidad, recristalizan dando otros silicatos y desaparecen de la roca. En esta zona prosigue la evolución de estos minerales hasta su eliminación final.

A modo de síntesis, podríamos decir que el sistema es cíclico. Cuando los silicatos primarios alcanzan la superficie terrestre se ven sometidos a procesos de hidrólisis y dan minerales de la arcilla. Al ser éstos transportados hasta las cuencas sedimentarias, y enterrados a grandes profundidades, recristalizan (los silicatos formados en superficie) regenerando los silicatos primarios.



LOS EFECTOS CLIMATICOS originan diferentes tipos de minerales de la arcilla. Así, por ejemplo, en las zonas ecuatoriales y en las tropicales húmedas el lavado químico es intenso, y los elementos que permanecen en el suelo se reorganizan en forma de caolinita, un aluminosilicato rico en aluminio si se le compara con otros minerales de la arcilla. También pueden dar gibbsita, que es un hidróxido de aluminio. La zonación no es definida. Cualquier mineral de la arcilla puede producirse en los suelos y sedimentos de cualquier zona climática, pero la tendencia de estos minerales a formarse en las distintas partes de la superficie terrestre viene indicada, de un modo sumario, en el esquema superior.

Ningún material extraído de la tierra tiene una gama tan amplia y variada de usos como la arcilla y ningún otro, a excepción del sílex, se ha utilizado más tiempo. Durante 10.000 años, el hombre ha sabido encontrar aplicaciones a la arcilla apareciendo cada año nuevos usos de la misma. Con razón puede considerársela uno de los principales minerales del mundo.

El mayor número de aplicaciones lo tiene en cerámica. El valor de la arcilla en este campo proviene de su plasticidad y de que se endurece al cocerla. Así pues, puede ser moldeada fácilmente y, después de cocerla, su forma es permanente, convirtiéndose en un objeto resistente tanto desde el punto de vista térmico como mecánico.

Al principio, los objetos de cerámica se hacían con tierras ricas en illita, ya que las temperaturas necesarias para cocer este mineral eran bajas. Con el tiempo (antes en China que en otros lugares) el hombre aprendió a buscar tierras más refractarias para construir hornos, y así aumentar las temperaturas de cocción. Se obtuvo así el material denominado gres, que se consigue cociendo la arcilla a una temperatura lo suficientemente alta como para que el objeto funda parcialmente, haciéndose por tanto impermeable. Los azulejos, las pipas de fumar hechas de cerámica y los utensilios de cocina del mismo tipo forman parte de los objetos fabricados de este modo. Cuando se somete la caolinita a temperaturas aún más elevadas se pueden obtener objetos de loza y sanitarios. Cuando la caolinita es muy pura y la fusión completa, se obtiene un vidrio traslúcido: la porcelana. Los distintos tipos de porcelana de esta clase (de China, de Dresde, de Bohemia y de Sèvres) son muy conocidos, pero no hay que olvidar la ingente producción de porcelana industrial destinada a la fabricación de aislantes eléctricos.

Aplicaciones en construcción e ingeniería

Desde la antigüedad, las arcillas han sido empleadas en la construcción. La arcilla mezclada con arena o paja forma una suerte de argamasa basta ("daub", en inglés). Aún hoy en día una tercera parte de la humanidad vive en casas hechas de arcilla, y no voy ahora a alargarme sobre el uso generalizado de los ladrillos. Las tejas se hacen igualmente con arcilla corriente, pero se cuecen a temperaturas más elevadas al objeto de impermeabilizarlas. Después de las tejas y los ladrillos vienen los cementos. Se trata de una mezcla de caliza y arcilla (un 25 por ciento aproximadamente),

que se cuece a una temperatura de 1400 grados centígrados. La sílice y la alúmina de la arcilla forman silicatos y aluminatos de calcio que, al mezclarse con agua, producen una gran cantidad de pequeños cristales, los cuales forman una trama resistente característica del cemento endurecido.

La cerámica es igualmente importante en la industria de los refractarios, es decir, en los hornos de temperaturas elevadas. Las paredes de un horno deben protegerse del calor mediante un revestimiento refractario, normalmente hecho con una mezcla de arena y arcilla. Cuanto mayor es la cantidad de caolinita pura en la mezcla, mayor puede ser la temperatura (hasta 1800 grados centígrados). Este tipo de protecciones son decisivas en los hornos de ladrillos, en los de las fábricas de vidrio, en los de pan y en numerosas clases de los utilizados en la industria metalúrgica.

Desde la antigüedad se aprovechó el que con la arcilla pueda hacerse una especie de argamasa impermeable. Las cisternas y las conducciones de alimentación procedentes de las cuencas de captación de agua se recubrían con arcilla para que aquélla no se perdiera y se pudieran regar campos y jardines. Estas propiedades se siguen explotando en las conducciones de agua y en los canales. El suelo poroso puede hacerse impermeable inyectando mezclas de agua y arcilla. La inyección de un lodo arcilloso es muy corriente en las perforaciones petrolíferas. Introducido continuamente en el varillaje de perforación, el lodo refrigera la barrena ascendiendo luego por el entubado arrastrando consigo los trozos de roca triturados por aquélla.

Otra aplicación en ingeniería tiene su fundamento en la vermiculita. Cuando ésta se calienta, desaparece el agua de su estructura cristalina. El mineral se retuerce luego como un gusano, se expande y se torna ligero y poroso. Un edificio de 30 pisos hecho de hormigón que contenga vermiculita pesa 5000 toneladas mientras que sin vermiculita pesaría 19.000. La vermiculita se utiliza igualmente como aislante, térmico o sonoro, en las paredes de edificios y buques.

Los minerales de la arcilla, la montmorillonita especialmente, pueden fijar por absorción numerosas moléculas extrañas en la superficie de sus escamas. Esta propiedad se conocía desde antiguo cuando las arcillas de grano más fino (tierras de batanero) se empleaban en la limpieza de ropa y lanas. Actualmente en las zonas rurales de Marruecos se lava la ropa con "ghasul", nombre de una arcilla que contiene stevensita. Durante la Segunda Guerra Mundial en Europa se fabricaban los jabones con un elevado porcentaje de montmorillonita.

Estas propiedades adsorbentes tienen muchas aplicaciones en la industria. Entre ellas figuran la decoloración de aceites minerales, la filtración de cerveza, vino y jarabes, la clarificación del agua y el lavado de la lana. Las arcillas calcinadas (calentadas para eliminar la materia volátil o para que se produzcan otros cambios) o tratadas con ácido se vuelven muy activas, pudiendo emplearse como catalizadores en muchas operaciones industriales. La enorme superficie total de sus escamas acelera una serie de reacciones químicas industriales como el cracking, la oxidación y la síntesis.

La capacidad de adsorción de la arcilla desempeña también un papel muy importante en agricultura. Los minerales de la arcilla adsorben con rapidez muchos iones minerales libres existentes en el suelo. Además, los iones tienen enlaces débiles, lo que les permite un intercambio fácil con el hidrógeno de las raíces de las plantas, por ejemplo. De ahí que los minerales de la arcilla sean una fuente que suministra los minerales nutrientes requeridos por las plantas.

La capacidad de las arcillas del grupo de la esmectita para formar suspensiones estables coloidales es muy útil en la preparación de pulimentos, cosméticos, pesticidas y muchas otras substancias. El caolín, o arcilla blanca, tiene un uso muy generalizado para dar cuerpo y consistencia al papel. (Una tonelada del papel en el que está impresa esta revista contiene unos 190 kilogramos de caolín. Sin este mineral, el papel sería mucho menos opaco y absorbería tanta tinta que no se podrían reproducir las ilustraciones.)

Investigaciones recientes han demostrado que una serie de polímeros orgánicos pueden ser retenidos en la superficie de los minerales de la arcilla. De ahí surge la posibilidad de utilizar estos minerales en toda una industria de fabricación de compuestos sintéticos a base de arcilla y materiales orgánicos. Varios productos de este tipo han demostrado tener una resistencia térmica y mecánica mayor que los productos obtenidos sólo a partir de arcillas normales.

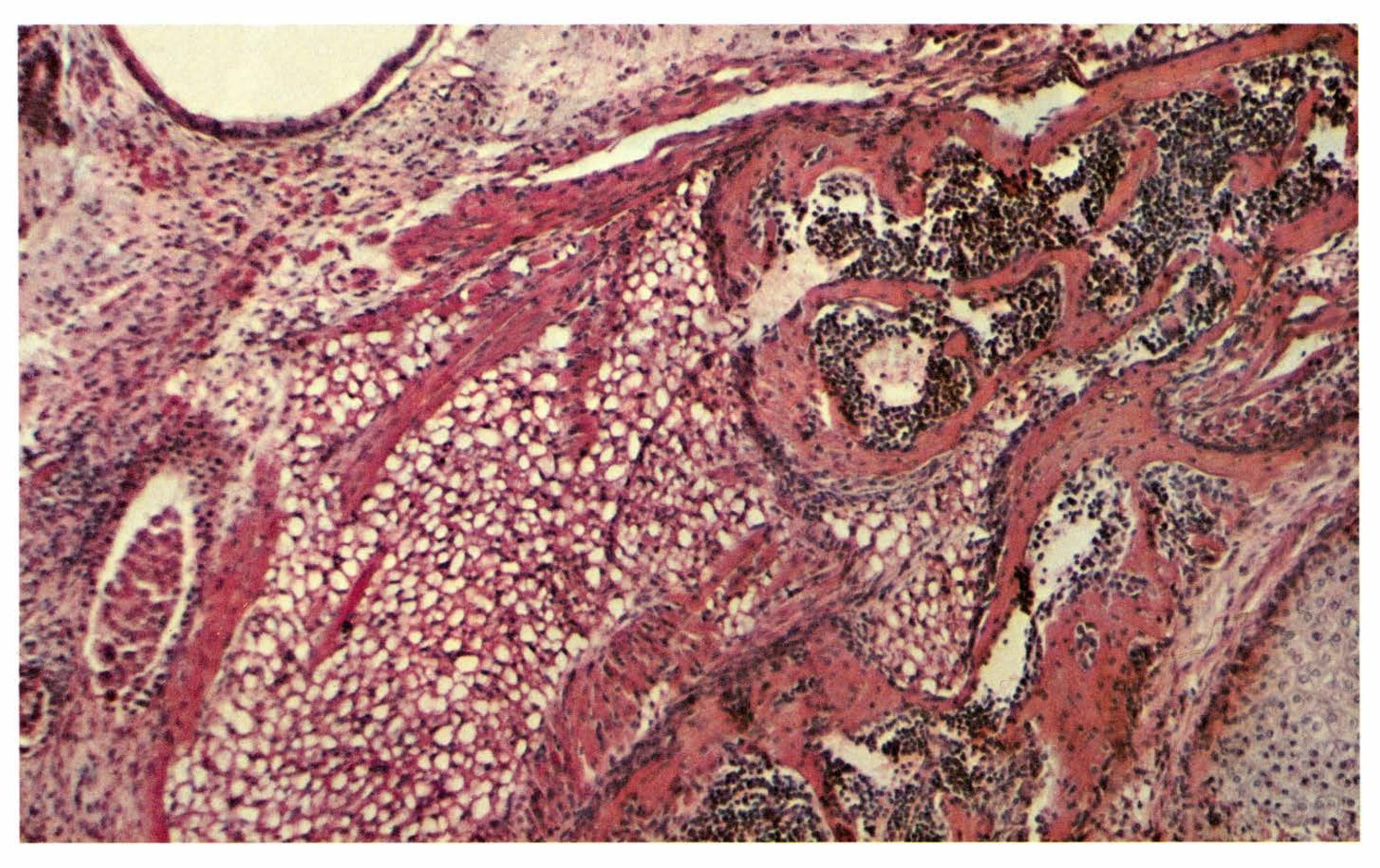
La arcilla y la vida

Varios investigadores creen que las propiedades de adsorción que presentan determinadas arcillas pudieron influir de un modo determinante en el origen de la vida. La hipótesis surge en el marco de un esfuerzo para simular las condiciones bajo las cuales los aminoácidos pueden haber formado proteínas en la tierra primitiva.

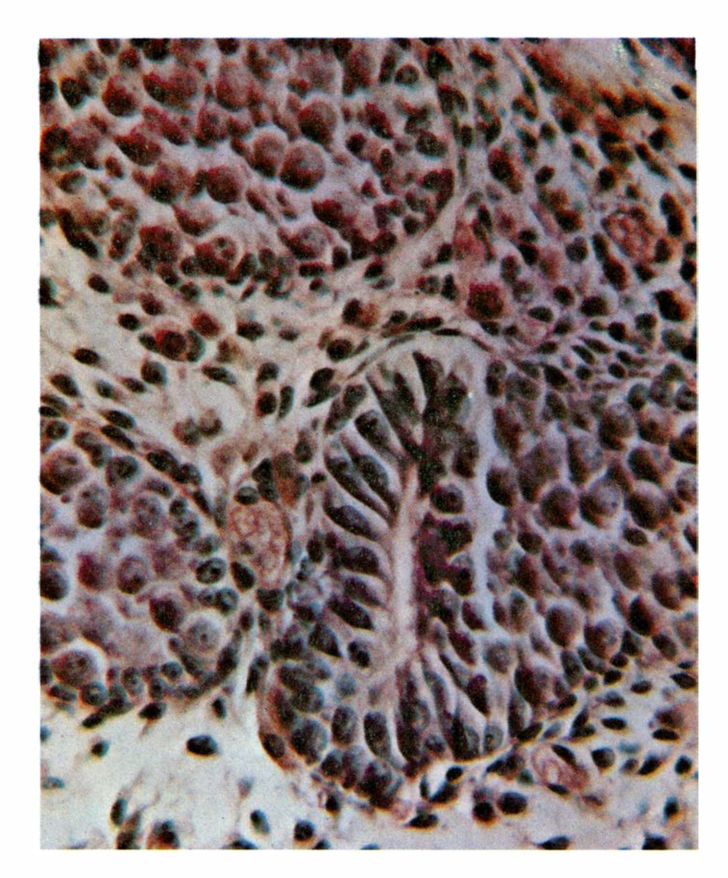
Según esta hipótesis, los aminoácidos simples formaron cadenas más largas, denominadas péptidos, utilizando la superficie de las partículas arcillosas. Se cree que la arcilla ha actuado de plantilla y catalizador en relación con la formación de largas cadenas peptídicas o proteínas. La hipótesis fue comprobada experimentalmente por Noam Lahav, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, David H. White, de la Universidad de Santa Clara, y Sherwood Chang, del Ames Research Center, de la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Añadieron una pequeña cantidad de solución del aminoácido glicina a diversos minerales de la arcilla. Luego sometieron la arcilla de forma secuencial a deshidratación a 60 grados centígrados, calentamiento a 94 grados y nueva hidratación con agua. Sometieron luego una serie de combinaciones similares de arcilla y glicina a temperaturas de 94 y 25 grados, sin cambiar para nada las condiciones de humedad o sequedad. Los principales resultados obtenidos permitieron ver que se producían más péptidos a distintas temperaturas en presencia de arcilla que cuando esta última se eliminaba, y que la producción de péptidos era más elevada cuando la temperatura y la humedad variaban que cuando se modificaba únicamente la temperatura.

En base a estos hallazgos los tres investigadores anteriormente citados propusieron que la fluctuación de la temperatura y de la humedad produce una distribución y redistribución de los aminoácidos en la superficie de las partículas de arcilla que favorece la unión de los aminoácidos para formar cadenas de péptidos. Cuando el agua entra en contacto con la superfice de la arcilla los puntos activos de esa superficie, que catalizan la formación de péptidos a partir de aminoácidos, quedan libres. Cuando temperaturas más elevadas hacen que el agua se evapore, se dispone entonces nuevamente de puntos catalíticos para la formación de otros aminoácidos, que se unen a una cadena ya existente o forman otras nuevas. Puesto que en las aguas y en la superficie de la tierra primitiva debió darse más de un aminoácido, el mismo ciclo de humedad y temperatura alternantes pudo haber sido responsable de la formación de cadenas peptídicas cada vez más complejas, produciendo luego, en última instancia, los precursores de las macromoléculas proteínicas, que son ya equivalentes a la propia vida.



TERATOMA TESTICULAR de un ratón macho adulto de la cepa 129 que muestra tejidos de muchos tipos bien diferenciados pero dispuestos caóticamente (*dibujo en la página opuesta*). Todos los tejidos resultan de la diferenciación de células carcinomatosas embrionarias, la estirpe del tumor.



TERATOMA ESPONTANEO que se desarrolla dentro de un tubo seminífero de un testículo de un feto de ratón. Un joven teratoma (*estructura ovalada*) formado por células carcinomatosas embrionarias se ve entre células germinales normales (sus originarias) en un tubo de un feto de 16 días.



TERATOMA EXPERIMENTAL (*estructura ovalada*) que puede inducirse fácilmente implantando crestas genitales (los precursores embrionarios de las gónadas, que contienen células germinales) extraídas de un feto de ratón macho de 12 días en el testículo de un ratón adulto de la misma cepa.

Teratomas y quimeras

Los teratomas son tumores constituidos por un revoltijo de células y tejidos diferenciados. Su estirpe celular maligna puede diferenciarse de manera normal en el embrión de ratón y dar lugar a las quimeras, o mosaicos genéticos

Karl Illmensee y Leroy C. Stevens

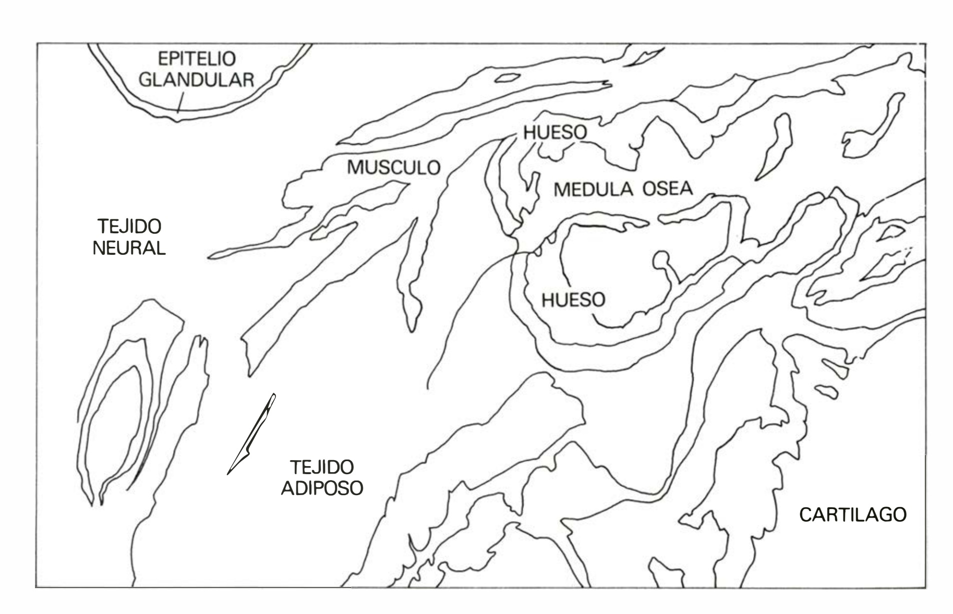
Un teratoma es un tumor constituido no sólo por células neoplásicas (como otros tumores) sino también por muchos tipos de células y tejidos diferenciados en diversos estados de maduración. Un teratoma típico puede incluir, por ejemplo, células nerviosas, musculares, sanguíneas, cutáneas, glandulares y células de otros tipos especializados. Las células pueden estar agregadas en verdaderas fibras musculares, tejidos glandulares o cerebrales, cartílago o hueso; englobados en la masa pueden haber cabellos y dientes. Los teratomas son merecedores de su nombre, derivado de la forma griega compuesta que se usa para designar lo "monstruoso". Sin embargo, las mismas propiedades que hacen a los teratomas parecer monstruosos, también los hacen biológicamente fascinantes; el disponer de teratomas inducidos experimentalmente en el ratón ha proporcionado un valioso instrumento de investigación para la patología, inmunología, genética y biología del desarrollo.

La estirpe celular de la que proliferan los teratomas se parece a células embrionarias indiferenciadas en su estructura y bioquímica y en los antígenos proteicos localizados en su superficie. La estirpe celular es, sin embargo, potencialmente maligna y las células se llaman carcinomatosas embrionarias; son responsables del crecimiento incontrolado de los teratomas. Cuando una célula carcinomatosa embrionaria se divide, puede dar lugar a dos nuevas células embrionarias, a una célula de este tipo y a una célula diferenciada normal o a dos células diferenciadas de prácticamente cualquier tipo. Mientras los tumores contengan células carcinomatosas embrionarias continúan creciendo; tales tumores son malignos y se les conoce como teratocarcinomas. Cuando todas las células embrionarias se diferencian en diversos tipos de tejido normal, los tumores dejan de crecer; son benignos y se suelen denominar simplemente teratomas.

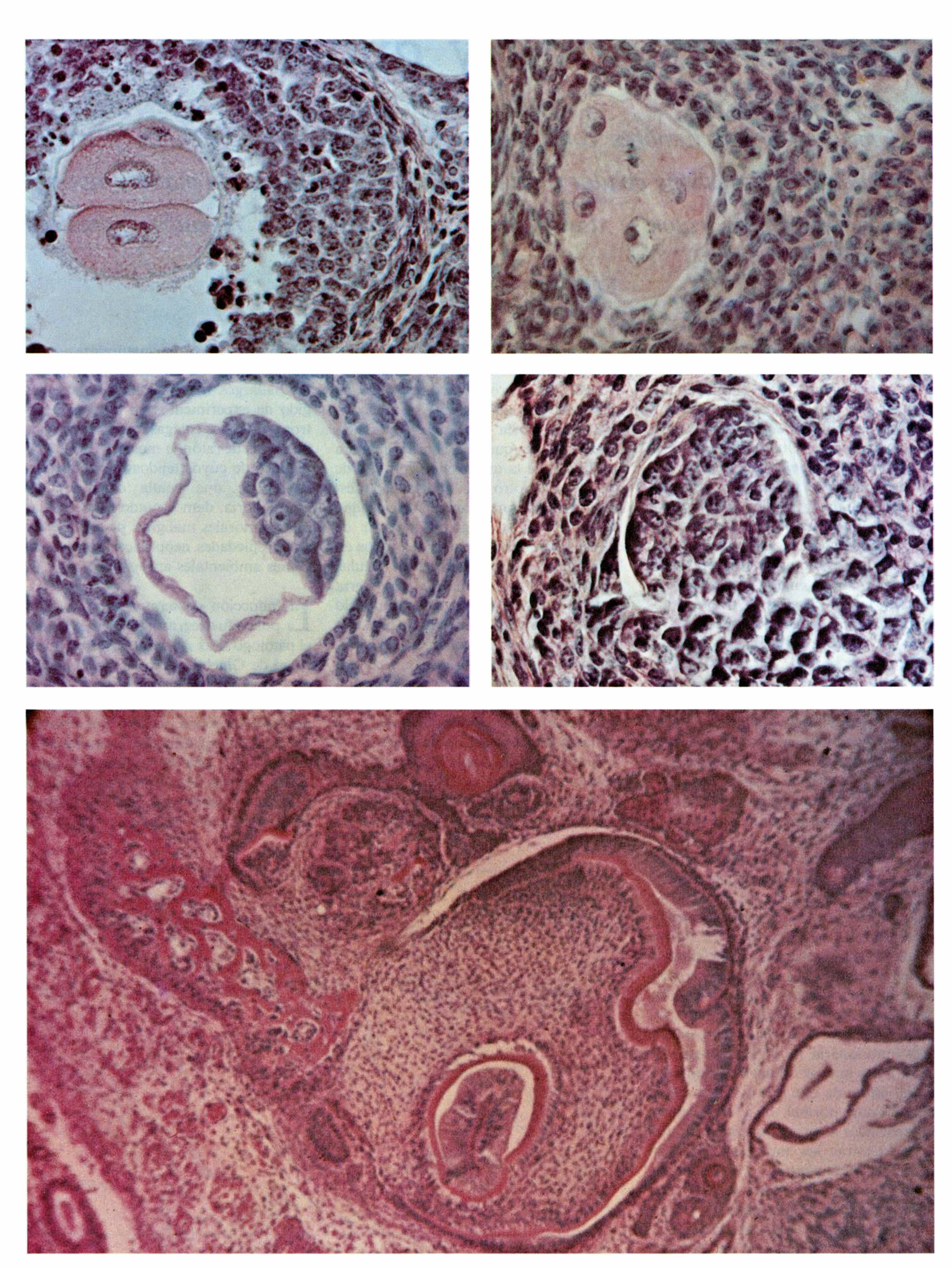
Los teratomas fueron observados en el ovario y el testículo de seres humanos en el siglo XIX, pero hasta hace poco su origen ha sido un misterio; su composición heterogénea llevó a la suposición incorrecta de que de alguna manera resultaban de la inclusión en un feto de porciones de otro feto abortado. Nuestras investigaciones han establecido que los teratomas se originan a partir de células germinales: a partir de óvulos en la hembra y de precursores de células espermáticas en el macho. En cierta manera, un teratoma sirve como modelo de un embrión de mamífero. En nuestras investigaciones aprovechamos esta similitud para estudiar una cuestión central del desarrollo: ¿Cómo se diferencia una única célula, el óvulo fertilizado, para formar cada uno de los diversos tipos celulares y tejidos del organismo?

Puesto que la célula carcinomatosa embrionaria es maligna, y no obstante da lugar a tejidos normales, hemos aprendido algo también, a partir de los teratomas, sobre la naturaleza de la transformación neoplásica. Algunos de los hallazgos más interesantes han surgido de experimentos en los que nosotros y nuestros colegas hemos producido quimeras de ratón, o mosaicos genéticos, algunos de cuyos tejidos normales derivaban de una célula carcinomatosa embrionaria, demostrando que estas células tumorales malignas pueden perder sus propiedades neoplásicas bajo condiciones ambientales apropiadas.

La inducción de teratomas en ratas y pollos fue registrada ya en 1907 por el patólogo Max Askanazy, de la Universidad de Ginebra, pero la manipulación experimental de los teratomas en ratones data sólo de 1953, cuando uno de nosotros (Stevens) observó por primera vez un teratoma testicular en un ratón de la cepa 129, una de las muchas líneas consanguíneas de ratones mantenidas en el Jackson Laboratory, en Bar Harbor. La observación de gran número de



VARIEDAD DE TEJIDOS en un teratoma testicular, indicada con este diagrama de la microfotografía superior de la página opuesta. El tumor contiene tejidos que normalmente derivan de cada una de las tres capas germinales embrionarias: cartílago, hueso con médula, tejido adiposo y fibras musculares, todos del mesodermo; tejido neural que deriva del ectodermo y, epitelio glandular, del endodermo.



TERATOMA OVARICO, que surge por partenogénesis en un ratón hembra de la cepa LT. Sin fertilización, un óvulo en el ovario se divide espontáneamente (*arriba a la izquierda*) y progresa para formar una mórula (*arriba a la derecha*) y un blastocisto (*centro a la izquierda*). Se desorganiza luego (*centro a la derecha*) para desarrollarse dando un teratoma (*abajo*) que contiene diversos tejidos diferenciados (*figura superior de la página opuesta*).

ratones macho de la cepa reveló que cerca del uno por ciento desarrollaban teratomas espontáneamente. Los tumores eran reconocibles ya a la semana después del nacimiento, cuando se destacaban porque aún contenían células indiferenciadas en proliferación, así como células diferenciadas de un teratoma típico maduro. Claramente, los ratones de la cepa 129 estaban de alguna manera predispuestos a la formación de teratomas. Mediante cría selectiva fue posible desarrollar una sublínea de la cepa en la que aproximadamente el 30 por ciento de los machos desarrollaban finalmente teratomas. Esto hizo posible investigar un cierto número de cuestiones, entre ellas: ¿Cuándo aparecen los teratomas por primera vez y de qué tipo de células se originan? ¿Qué factores genéticos y ambientales influyen en su formación?

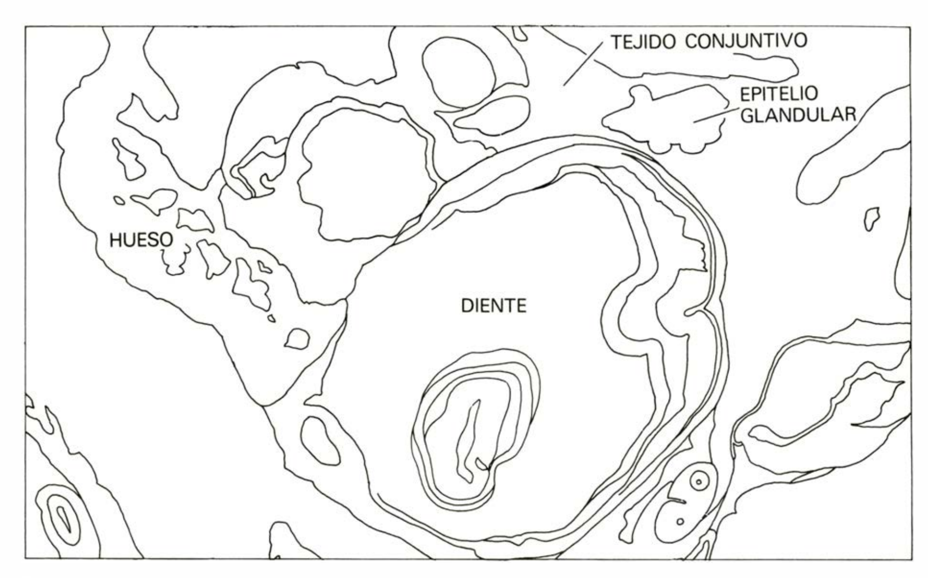
Los teratomas ya podían identificarse en fetos de la sublínea de la cepa 129 al décimoquinto día de gestación. Los tumores estaban integrados por agrupaciones de células indiferenciadas parecidas a las de un embrión normal de ratón de cinco días. Todos los teratomas en los fetos de 15 días se encontraron entre las células germinales primordiales en los tubos seminíferos del testículo. Estos tubos están formados por células de Sertoli y contienen únicamente células germinales primordiales. Debido a que los tumores estaban situados dentro de los tubos y a que sus células presentaban la estructura e incluso la ultraestructura de células germinales, parecía más verosímil que la célula de origen de un teratoma fuera una célula germinal primordial.

El parecido con un embrión joven persistía durante cierto tiempo, mientras se desarrollaba el tumor. En los ratones recién nacidos los teratomas contenían células diferenciadas que se correspondían con las tres capas germinales primarias del desarrollo normal: ectodermo, endodermo y mesodermo. Había dos tipos de epitelio. Uno se parecía al ectodermo de embriones jóvenes y se desarrollaba, en posteriores teratomas, dando piel o tejido nervioso; el otro se parecía a la faringe embrionaria y se desarrollaba dando tejido respiratorio o del tracto digestivo. Entre los tejidos epiteliales había células mesodérmicas que daban lugar a cartílago, músculo o hueso.

Los tamaños relativos de los teratomas en ratones recién nacidos y en etapas fetales correspondientes al décimoquinto día de la gestación sugirieron que los tumores se originaban el duodécimo día. El paso siguiente en el intento de comprender el inicio de los teratomas fue, por tanto, disecar las crestas genitales (las estructuras fetales de las que derivan los testículos o los ovarios) de fetos de 12 días de la cepa 129 y de otras diversas cepas consanguíneas e injertarlas en el riñón, hígado y testículo de adultos. Se trataba de ver si las crestas genitales, que contienen los precursores de las células germinales, formarían testículos con teratomas y si la localización particular del injerto influiría en la diferenciación de tejidos dentro de los teratomas.

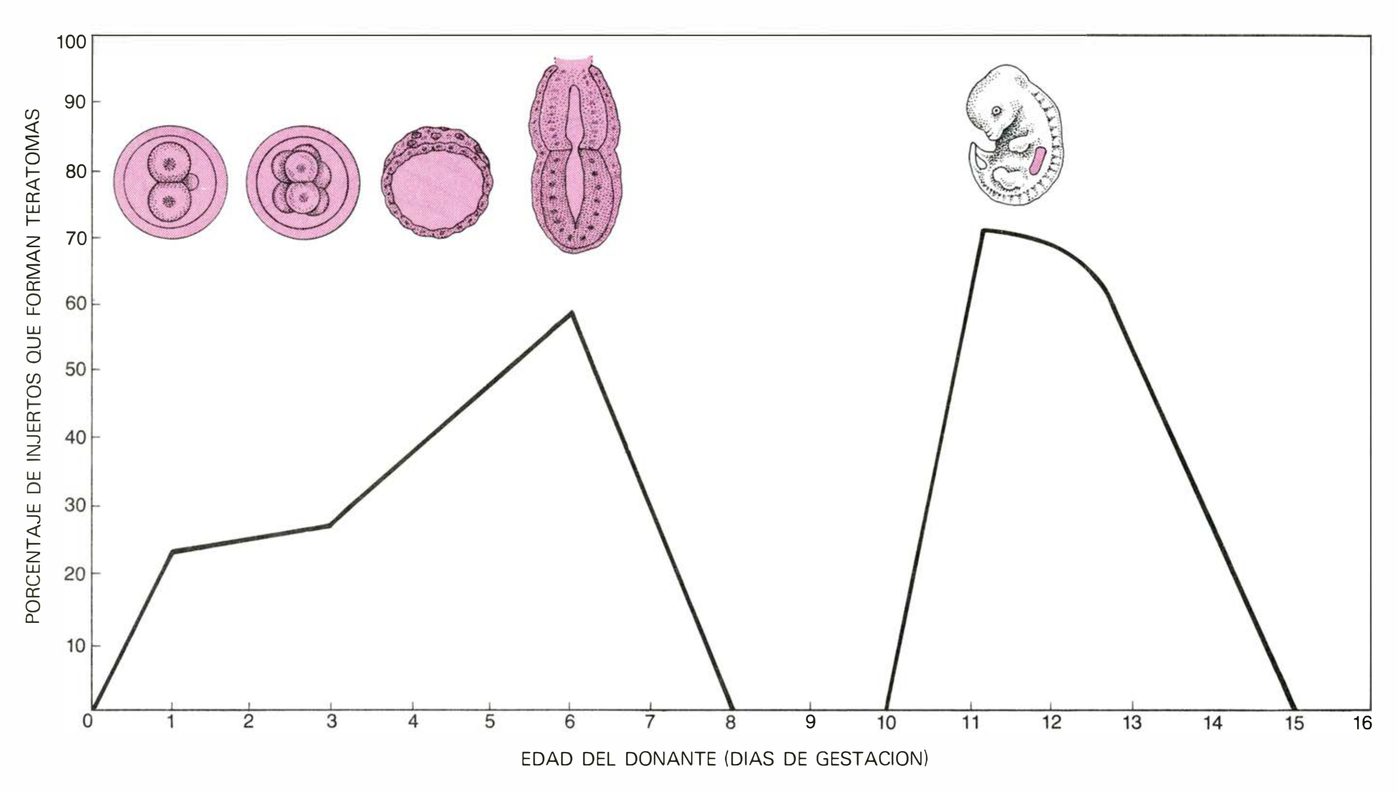
Cuando las crestas genitales masculinas se injertaron en el riñón o en el hígado, se desarrollaron dando testículos en los que los teratomas se formaban aproximadamente al ritmo normal para la cepa 129. Cuando las crestas genitales fueron injertadas en los testículos, por otro lado, un 70 por ciento formaron teratomas. Cuando se injertaron de forma similar crestas genitales de fetos de 13 días y de más edad, la incidencia de teratomas inducidos experimentalmente disminuyó de una forma brusca al aumentar la edad fetal. En otras palabras, después del décimotercer día de gestación, las células germinales pasan por una fase de maduración que evita la formación de teratomas.

La capacidad de inducir teratomas de



VARIEDAD DE TEJIDOS en un teratoma ovárico, indicada mediante este diagrama de la microfotografía en color de la parte inferior de la página opuesta. El tumor contiene un diente, hueso, tejido conjuntivo y epitelio glandular, todos ellos derivados de células carcinomatosas embrionarias malignas.


CUERPOS EMBRIOIDES, que se originan de células carcinomatosas embrionarias inyectadas en el peritoneo (cavidad abdominal) de ratones adultos. Estos cuerpos están compuestos de un grupo de células carcinomatosas embrionarias rodeadas por endodermo primitivo. (Se parecen a embriones jóvenes.)



TERATOMAS EXPERIMENTALES, inducidos injertando un embrión joven (*izquierda*) o la cresta genital (*color*) de un feto (*derecha*) en una zona extrauterina en un ratón adulto. Como se ve, es más probable que produzca un teratoma un embrión de 6 días o una cresta genital de 11 a 13 días.

forma experimental, a una tasa muy superior a la incidencia espontánea, abrió el camino para la investigación intensiva de estos tumores y específicamente hizo posible un nuevo planteamiento para establecer la célula de origen. Los ratones que son homocigotos para una mutación llamada *Steel* (esto es, ratones en los que dos cromosomas homólogos llevan ambos el gen mutado) carecen de células germinales y son estériles. La mutación fue introducida en la sublínea teratomatosa de la cepa 129 y se injertaron crestas genitales de 12 días de fetos portadores de *Steel* y de sus compañeros de camada en los testículos de ratones adultos. Algunos de los fetos eran homocigotos para *Steel* y otros tenían sólo un gen *Steel.* (Los ratones homocigotos para *Steel* tienen pelaje blanco y sus compañeros de camada pelaje negro, de modo que pudimos identificar los fetos homocigotos injertando también tejido cutáneo fetal en los testículos y observando después el color del trozo injertado.)

De las crestas genitales de los compañeros de camada normales, el 75 por ciento desarrollaron testículos con teratomas, aproximadamente la incidencia habitual para teratomas experimentales. En acusado contraste, todas las crestas genitales injertadas de los compañeros de camada que eran homocigotos para *Steel* desarrollaron testículos sin teratomas. Las crestas genitales normales contenían células germinales primordiales; las crestas genitales de los compañeros de camada homocigotos, no. Por tanto el experimento comprobó lo que la primera observación había sugerido: los teratomas testiculares se originan a partir de células germinales primordiales que –por razones aún desconocidas– se transforman en células neoplásicas.

La semejanza de los teratomas con los embriones jóvenes sugirió otro experimento, en el que injertamos embriones jóvenes en el testículo o riñón de huéspedes adultos. Cuando un embrión de una edad máxima correspondiente al sexto día de gestación se injerta en una de estas zonas extrauterinas, continúa desarrollándose, pero de una manera desorganizada, proliferando y diferenciándose las células embrionarias en muchos tipos de tejidos maduros. Después de un mes, aproximadamente la mitad de los injertos logrados se parecen a teratomas formados por diversos tejidos adultos bien diferenciados. La otra mitad forma típicos teratocarcinomas que contienen no sólo células diferenciadas sino también células embrionarias indiferenciadas similares a la estirpe celular de los teratocarcinomas espontáneos.

Los teratomas derivados de embrión se parecen a los de ovario y testículo en todas las características observables, aunque no se originan de células germinales sino de las células ectodérmicas de los embriones. (Cuando se injertan células embrionarias distintas de las ectodérmicas en zonas extrauterinas, no forman teratomas.) Aparentemente, las células embrionarias ectodérmicas hasta el sexto día de gestación son capaces de dar lugar a muchos tipos de células y tejidos, incluyendo los derivados normales del endodermo y mesodermo, así como del ectodermo y posiblemente además (aunque aún no ha sido demostrado) a células germinales precursoras.

La fuente principal de material teratomatoso ha sido el teratocarcinoma trasplantable. Se injerta un teratoma debajo de la piel de otro ratón que sea histocompatible con el huésped original. Si el teratoma es maligno, crece; después de tres semanas, parte del material del tumor se trasplanta a otro ratón histocompatible. (Si no fuera trasplantado, continuaría creciendo y acabaría por matar a su huésped.) El proceso se repite cada tres semanas. Algunos teratocarcinomas trasplantables han sido mantenidos de esta manera durante muchos años. La estirpe celular maligna de algunos de ellos permanece totipotente (capaz de diferenciarse en diversos tipos celulares); en otros casos, el potencial de desarrollo de la estirpe celular queda limitado después de varias generaciones de trasplantes, de modo que las células se diferencian en unos pocos tipos de tejidos o incluso sólo en un tipo; por ejemplo: tejido nervioso, músculo esquelético o endodermo.

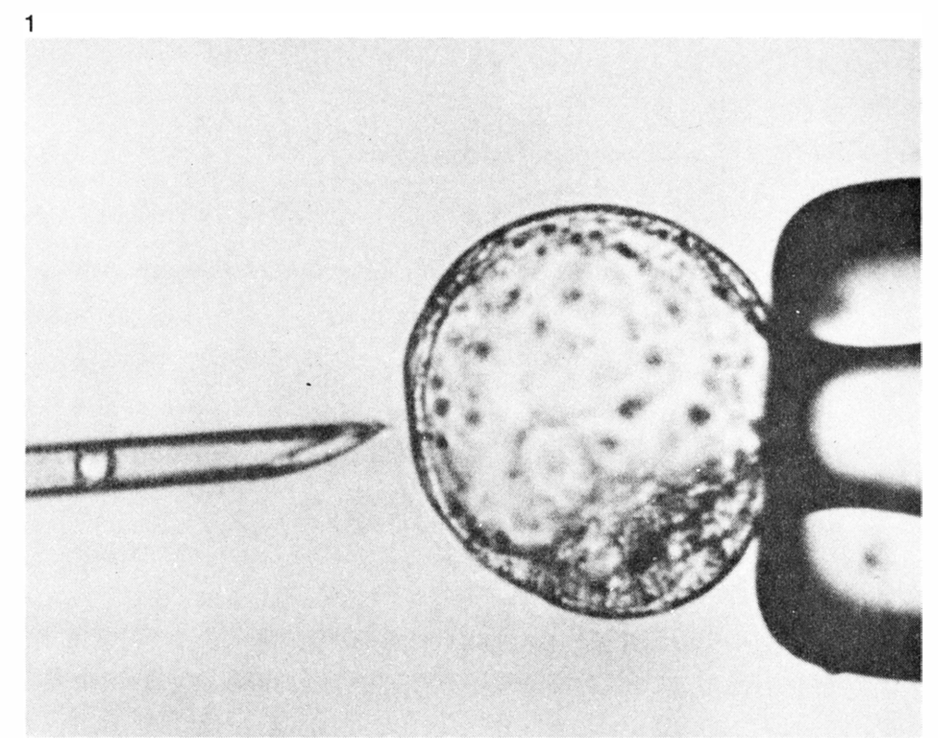
Cuando las células de algunos tumores trasplantables se inyectan en la

cavidad peritoneal de un ratón, estimulan las células que forran el peritoneo para producir un acúmulo de líquido, o ascitis. Las células tumorales en suspensión en el líquido continúan proliferando como teratocarcinomas ascíticos, que tienden a formar pequeñas estructuras muy similares a embriones de ratón normales de cinco o seis días: un conjunto interno de células que se parecen al ectodermo primitivo, rodeado de una sola capa de células análoga al endodermo primario de los embriones jóvenes. Estas estructuras fueron observadas por primera vez en 1940, en teratomas testiculares humanos, por el patólogo francés Alfred Peyron. Las llamó "cuerpos embrioides" y estaba realmente tan impresionado por su parecido con los embriones normales que anunció (a pesar de su localización) que había descubierto una singular colección de embriones humanos jóvenes.

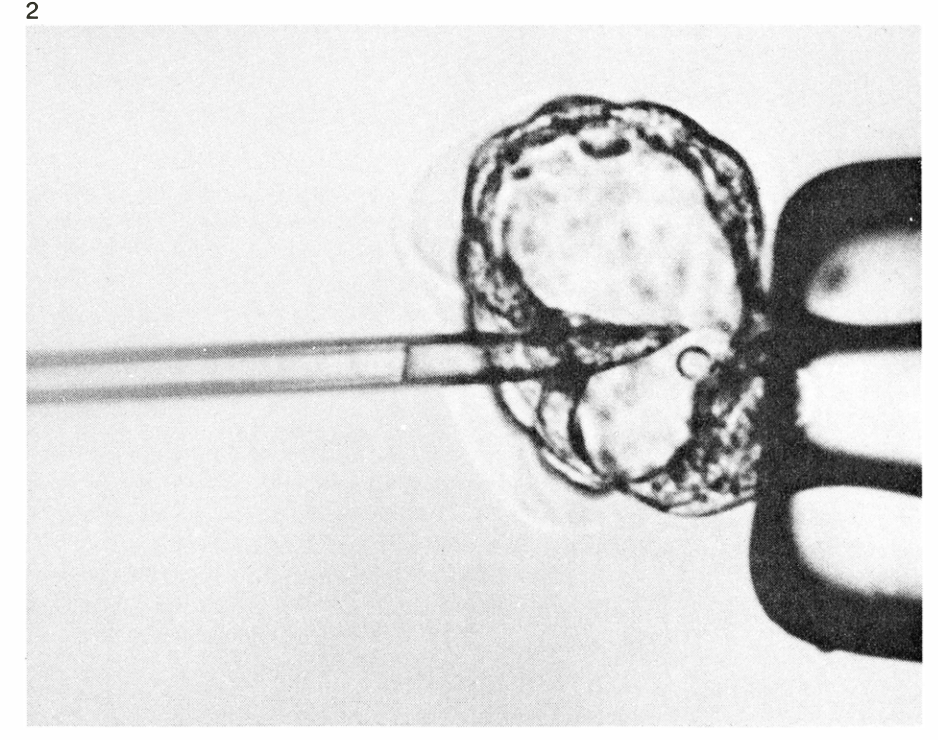
En el líquido intraperitoneal los cuerpos embrioides de ratón crecen y luego se dividen para formar dos nuevos cuerpos; pueden ser retrasplantados y mantenidos en este régimen durante muchos años. Si injertamos un cuerpo embrioide en cualquier zona de un ratón adulto, crece para formar un tumor sólido compuesto de diversos tipos de tejido diferenciado así como de células carcinomatosas embrionarias indiferenciadas. Esto significa que la estirpe celular de los cuerpos embrioides puede mantener su totipotencialidad durante muchos años, aun cuando no lo exprese. Dado que estas células son fácilmente identificadas y manipuladas, se han convertido en un valioso instrumento en el estudio de la diferenciación.

En 1964, Lewis J. Kleinsmith y G. Barry Pierce demostraron en la Universidad de Michigan que incluso una sola célula teratocarcinomatosa puede permanecer totipotente. Colocaron una célula carcinomatosa embrionaria en un pequeño capilar de vidrio, que implantaron debajo de la piel de un ratón adulto. La célula implantada se dividió y el clon de células hijas proliferó y se

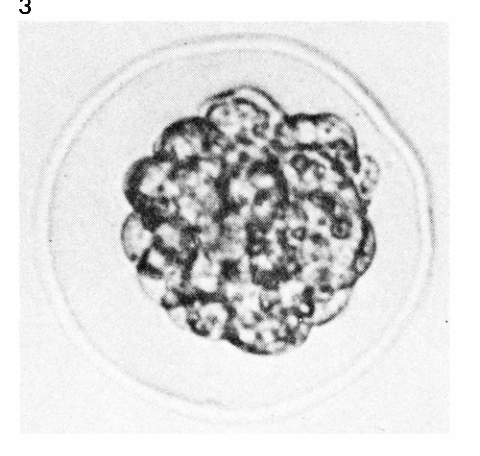
1



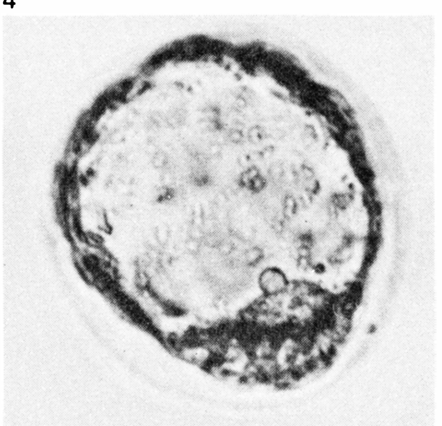
2



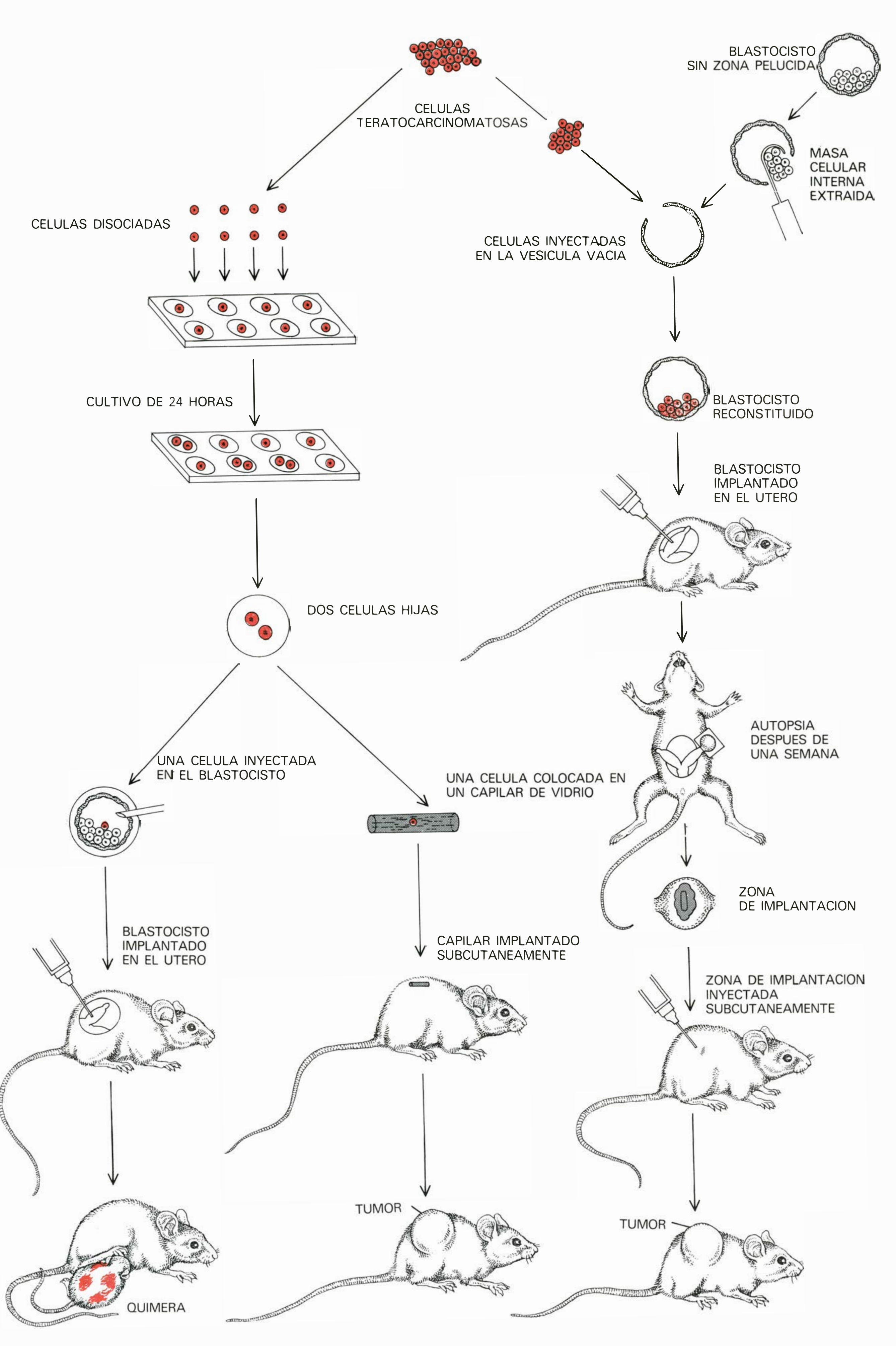
3



4



CELULA TERATOCARCINOMATOSA inyectada microquirúrgicamente en un blastocisto de ratón, que es un embrión de cuatro días y medio. El blastocisto, que mide unos 0,075 milímetros de diámetro, está fijado al extremo de una pipeta roma. Se ve una sola célula tumoral en la pipeta de inyección (*1*). La célula es inyectada y se une a la masa celular interna, las células que darán lugar al desarrollo del embrión (*2*). El blastocisto se colapsa después de la manipulación (*3*), pero se expande de nuevo después de unas pocas horas de cultivo (*4*); la célula tumoral permanece unida a la masa celular interna, con la que se integrará durante el desarrollo posterior. (Karl Illmensee.)


CELULAS
TERATOCARCINOMATOSAS
BLASTOCISTO
SIN ZONA PELUCIDA
MASA
CELULAR
INTERNA
EXTRAIDA
CELULAS DISOCIADAS
CELULAS INYECTADAS
EN LA VESICULA VACIA
CULTIVO DE 24 HORAS
BLASTOCISTO
RECONSTITUIDO
BLASTOCISTO
IMPLANTADO
EN EL UTERO
DOS CELULAS HIJAS
AUTOPSIA
DESPUES DE
UNA SEMANA
UNA CELULA INYECTADA
EN EL BLASTOCISTO
UNA CELULA COLOCADA EN
UN CAPILAR DE VIDRIO
ZONA
DE IMPLANTACION
BLASTOCISTO
IMPLANTADO
EN EL UTERO
CAPILAR IMPLANTADO
SUBCUTANEAMENTE
ZONA DE IMPLANTACION
INYECTADA
SUBCUTANEAMENTE
TUMOR
TUMOR
QUIMERA

diferenció en diversos tipos celulares, dando finalmente lugar a un tumor multidiferenciado. Por diversas observaciones no fue posible, sin embargo, llegar a la conclusión, a partir de este tipo de experimento, de que las células carcinomatosas embrionarias son de hecho totipotentes, es decir, equivalentes realmente a células embrionarias jóvenes normales en lo referente a su capacidad de desarrollo. Por un lado, algunas células hijas continuaban siendo malignas, sugiriendo que quizá su transformación neoplásica estaba determinada genéticamente. Por otro, algunos de los tejidos diferenciados permanecían anormales e inmaduros. La ausencia de ciertos tejidos (riñón, timo, pulmón e hígado) en todos los muchos tumores sólidos que se examinaron, sugirió que la estirpe celular podía ser comparable a células embrionarias tardías cuya capacidad de desarrollo había quedado limitada.

A pesar de las muchas similitudes morfológicas, bioquímicas e inmunológicas entre células teratocarcinomatosas y células embrionarias normales había, después de todo, una gran diferencia: las células teratocarcinomatosas eran malignas y algunas de sus descendientes parecían continuar siendo malignas a través de muchas generaciones. Para demostrar claramente la totipotencia de la célula del teratocarcinoma se tendría que demostrar que las propiedades malignas de las células no persistían necesariamente, sino que eran reversibles bajo condiciones ambientales apropiadas. Estas condiciones pueden obtenerse colocando la estirpe celular del teratoma maligno en estrecha asociación con células normales del embrión joven.

En 1974, Ralph L. Brinster, de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Pennsylvania, anunció estos experimentos. Inyectó células teratocarcinomatosas en blastocistos, que son embriones muy jóvenes (de cuatro días y medio), colocando las células inyectadas cerca de la masa celular interna del blastocisto, algunas de cuyas células dan lugar al futuro embrión. Transfirió luego los blastocistos al útero de "madres adoptivas", hembras que habían sido "pseudoembarazadas" (mediante acoplamiento con machos vasectomizados y por tanto estériles) de modo que los embriones extraños se implantarían y desarrollarían a término. De los ratones que nacieron, uno tenía manchas parduscas en su pelaje blanco. El pelaje blanco procedía de la cepa que había suministrado los blastocistos y por ende la mayoría del material embrionario; las manchas parduscas eran el color "agutí" (de pelos con bandas negras y amarillas) de los animales de los que procedían las células teratocarcinomatosas inyectadas. El ratón era aparentemente una quimera (palabra derivada del nombre de una bestia de la mitología griega que tenía la cabeza de león, el cuerpo de cabra y la cola de serpiente).

El informe de Brinster sobre el quimerismo del pelaje fue una alentadora indicación de que las células carcinomatosas embrionarias podían perder su malignidad y diferenciarse normalmente. Por desgracia, los blastocistos que implantó se habían originado de una cepa criada al azar de ratones albinos cuya heterogeneidad genética hizo imposible identificar cualquier participación de las células tumorales en otros tejidos. En 1974, junto con Beatrice Mintz, del Instituto de Investigación del Cáncer, en Filadelfia, inyectamos células carcinomatosas embrionarias de una cepa 129 de teratocarcinoma ascítico en blastocistos de otras cepas consanguíneas que llevaban cierto número de marcadores genéticos, de modo que las células derivadas de los blastocistos pudieran distinguirse más tarde de las derivadas del tumor.

Los cuerpos embrioides, de los que se tomaron las células carcinomatosas embrionarias inyectadas tenían una larga historia. En 1967, en el Jackson Laboratory, un embrión macho de seis días de la cepa 129 había sido injertado en el testículo de un huésped adulto, induciendo la formación de un teratocarcinoma experimental que se propagó como un tumor trasplantable a través de algunas generaciones y se convirtió luego en un teratocarcinoma ascítico. Este se mantuvo durante ocho años en el líquido peritoneal de ratones y servía como fuente de los cuerpos embrioides de los que obtuvimos las células carcinomatosas embrionarias por inyección.

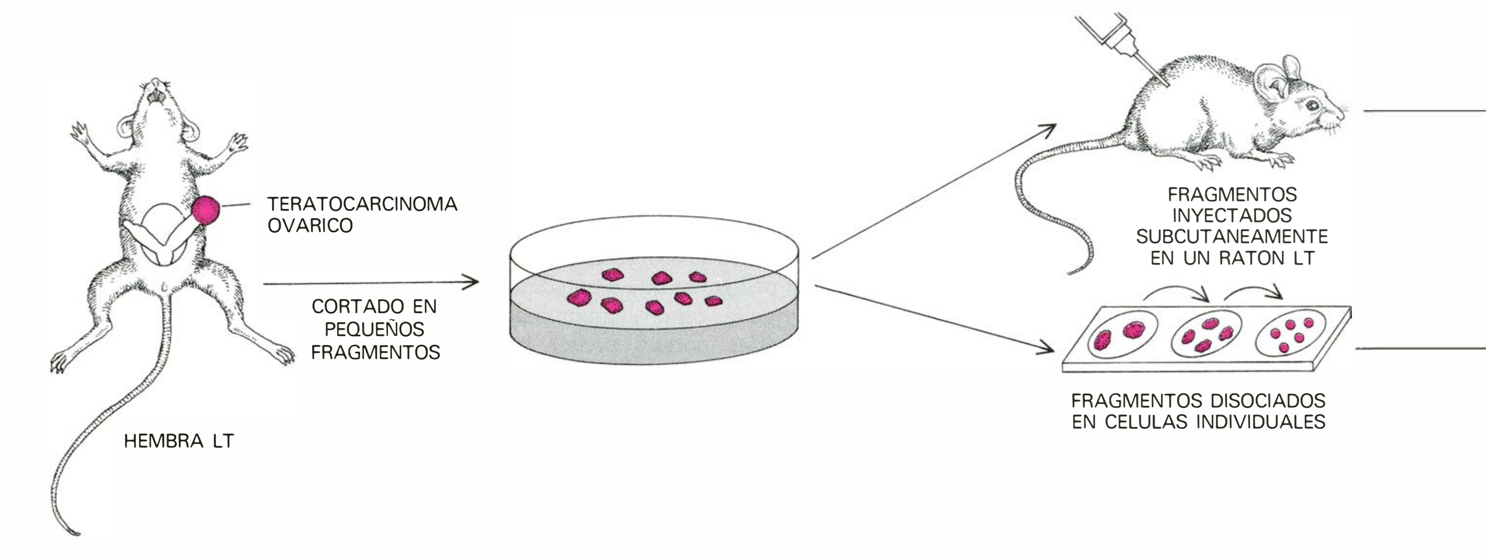
Una serie de experimentos produjo unos 40 ratones quiméricos sanos, algunos de los cuales superaron la edad de un año (aproximadamente la mitad de la duración de la vida de un ratón normal) antes de que se les practicara la autopsia para análisis posteriores. En estas quimeras no había señales de teratomas. (Ocasionalmente, los teratomas sí que se desarrollaban en progenies no quiméricas, es decir, en ratones que de otra manera no mostraban participación de células teratocarcinomatosas en sus tejidos.) En las quimeras sanas pudimos identificar, además de las manchas de color del pelaje, un gran número de productos genéticos, más específicos de la sublínea teratomatosa de la cepa 129 (o sea de las células carcinomatosas embrionarias) que de la cepa blastocisto. Estos productos incluían hemoglobina en glóbulos rojos, inmunoglobulinas en células plasmáticas, proteínas hepáticas en células del hígado, melanina negra en ciertas células epidérmicas, melanina amarilla en células del folículo piloso y una variante electroforética del enzima glucosa-fosfato isomerasa en prácticamente todos los órganos. Las tres capas germinales embrionarias –endodermo, ectodermo y mesodermo– estaban representadas en los tejidos mostrando tales marcadores, de la misma manera que los tejidos no observados ordinariamente en teratocarcinomas, entre los que se contaban el hígado, el riñón y el pulmón. En dos casos las células derivadas de las células carcinomatosas embrionarias llegaron incluso a formar espermatozoides que fertilizaron óvulos y dieron lugar a una camada sana cuyos tejidos manifestaban todos los marcadores de la cepa 129 (o células carcinomatosas embrionarias).

En la búsqueda por demostrar la diferenciación normal de una sola célula carcinomatosa embrionaria, procedimos a inyectar células individuales en blastocistos. Los resultados fueron intrigantes: la célula tumoral individual contribuyó clónicamente en todos los tejidos principales de un ratón quimérico, que creció con normalidad hasta la edad adulta. Con ello se establecía inequívocamente la totipotencia equivalente a la de las células embrionarias jóvenes para las células carcinomatosas embrionarias individuales. Después de casi ocho años –unas 200 generaciones de trasplantes– como componente de un tumor altamente maligno, esta estirpe celular de teratoma fue capaz de expresar su reperto-

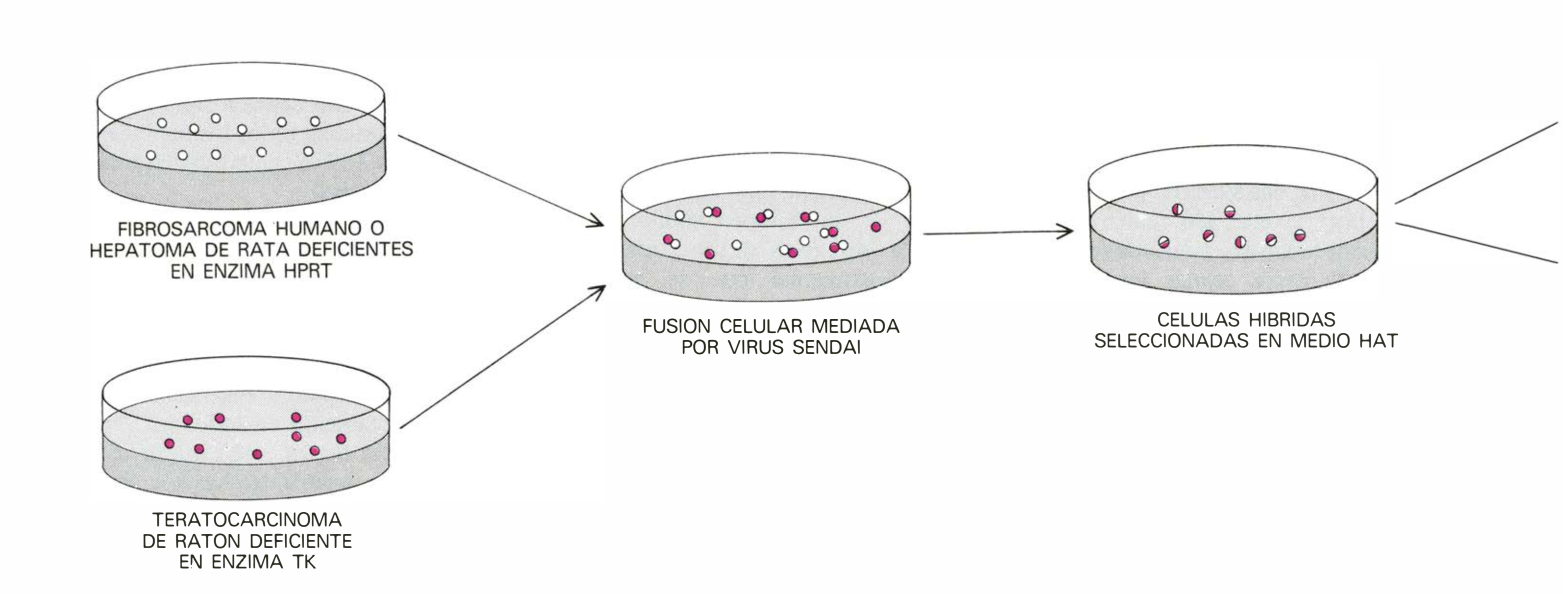
EXPERIMENTO DE INYECCION DE UN BLASTOCISTO: demostró la capacidad de una sola célula teratocarcinomatosa para diferenciarse normalmente. Las células teratocarcinomatosas son disociadas con un enzima proteolítico y se cultivan individualmente. Algunas células tumorales se dividen para formar dos células hijas, una de las cuales se inyecta en un blastocisto de una cepa de ratón diferente. Se implanta el blastocisto en el útero de una "madre adoptiva", pseudoembarazada, donde da lugar a un ratón quimérico sano (*izquierda*) que tiene tejidos derivados de células tumorales en el pelaje (*color*) y en órganos internos. La otra célula hija, en un capilar de vidrio, se implanta debajo de la piel de un ratón adulto y se desarrolla dando un teratocarcinoma (*centro*), demostrando que una sola célula tumoral puede o bien diferenciarse normalmente o bien permanecer maligna, según el medio ambiente. Con el fin de demostrar que es necesaria la presencia de células embrionarias para la reversión de la malignidad, se inyectan células teratocarcinomatosas en un blastocisto del que se ha extirpado (*derecha*) la masa celular interna; el blastocisto reconstituido se implanta en el útero de una madre adoptiva. El lugar de implantación se extrae y se trasplanta debajo de la piel de un ratón; forma un teratocarcinoma.

rio genético completo en una secuencia ordenada de diferenciación en tejidos somáticos y de línea germinal. La inversión de la malignidad era aparentemente un proceso estable, ya que cuando se injertaban fragmentos de los tejidos en mosaico derivados del tumor debajo de la piel de ratones histocompatibles, nunca formaban tumores. Sin embargo, cuando las células carcinomatosas embrionarias originales eran implantadas subcutáneamente, formaban grandes teratocarcinomas.

Aún se podría sostener que la población de células carcinomatosas embrionarias era heterogénea con respecto a las propiedades malignas, de modo que una célula podría ser capaz de diferenciarse normalmente y otra célula podría ser destinada a formar un tumor. La explicación alternativa de los resultados experimentales era que una sola célula carcinomatosa embrionaria puede o bien diferenciarse normalmente o bien dar lugar a un tumor, según el microambiente del lugar donde casualmente se inyecte. Con el fin de distinguir entre estas dos posibilidades modificamos el experimento una vez más. Se cultivaron células carcinomatosas embrionarias individuales en un medio apropiado y algunas se dividieron para formar dos células hijas. Una de las células hijas se



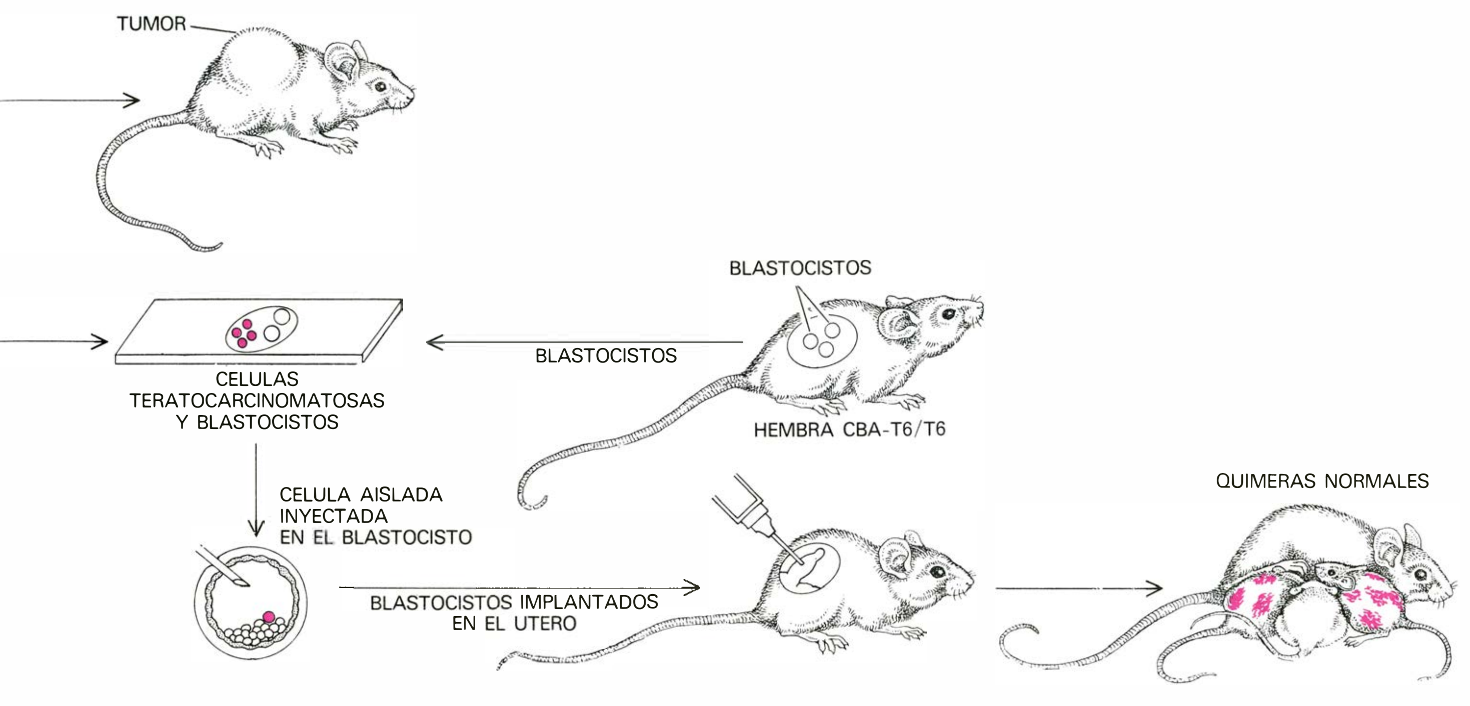
TERATOCARCINOMA OVARICO extraído de una hembra de la cepa LT y cortado luego en pequeños fragmentos. Unos fragmentos se implantan bajo la piel de otro ratón LT, donde forman un tumor maligno. Otros fragmentos son disociados para obtener células, que se inyectan en blasto-



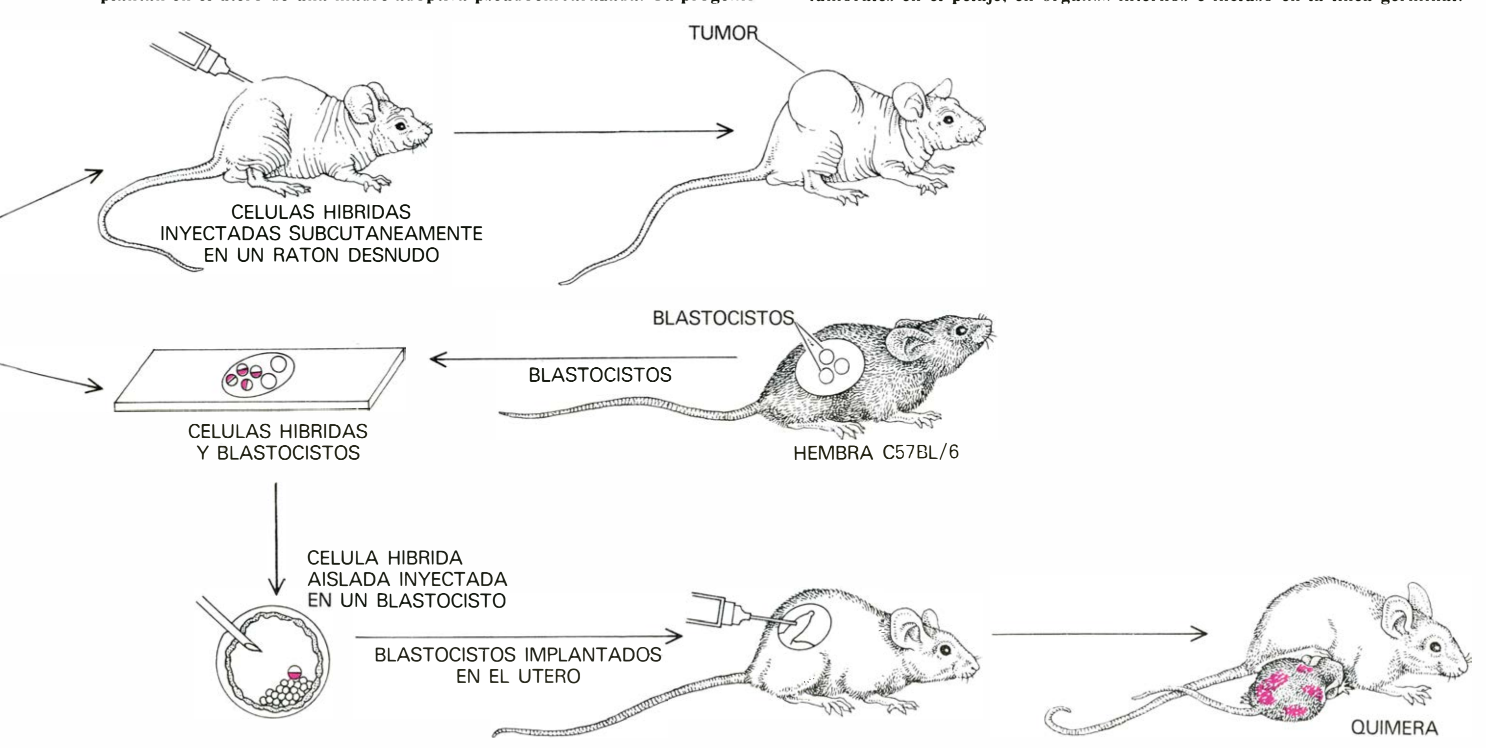
SISTEMA DE BIOENSAYO, desarrollado por combinación de las técnicas de hibridación celular con el procedimiento de inyección en un blastocisto. Las células de un teratocarcinoma de ratón deficientes en un enzima (TK) son cultivadas en presencia del virus Sendai, inactivado, con células tumorales humanas o de rata deficientes en un enzima diferente (HPRT). Algunas de las células se fusionan, formando células híbridas que se man-

inyectó a un blastocisto y se desarrolló en una madre adoptiva; la otra célula hija se implantó debajo de la piel de un ratón adulto. En algunos casos la célula inyectada en el blastocisto participó en la diferenciación normal de tejidos mientras que su célula hermana implantada subcutáneamente dio lugar a un teratocarcinoma. Aparentemente el ambiente embrionario era el responsable de la diferencia.

Se obtuvieron pruebas posteriores para apoyar esta conclusión inyectando células carcinomatosas embrionarias en blastocistos, pero privándolas de la influencia ambiental de las células embrionarias normales. Se extirpó toda la masa celular interna (que da lugar al futuro embrión) de los blastocistos y en su lugar se inyectaron a los trofoblastos vacíos, o envolturas, unas 20 células carcinomatosas embrionarias. Cuando se colocó en el útero de una madre adoptiva un blastocisto reconstruido que contenía sólo células tumorales, fue capaz de implantarse pero no se desarrolló para dar un embrión. Si se extirpaba la zona de implantación (la pared uterina y el blastocisto) y se colocaba debajo de la piel de un huésped histocompatible, daba lugar a un teratocarcinoma. El análisis enzimático del tumor estableció que se originaba únicamente a partir de las células



cistos tomados de hembras de una cepa diferente; los blastocistos se implantan en el útero de una madre adoptiva pseudoembarazada. Su progenie incluye ratones quiméricos normales que presentan participación de células tumorales en el pelaje, en órganos internos e incluso en la línea germinal.



tienen en un medio de cultivo especial (HAT) en el que sólo pueden sobrevivir las células híbridas. Inyectadas en ratones "desnudos" inmunodeficientes, las células híbridas forman tumores malignos. Pero cuando las células híbridas malignas se inyectan en blastocistos de una cepa de ratones negros y los blastocistos se implantan en una madre adoptiva, las células se diferencian normalmente, participando en el pelaje y en otros órganos.

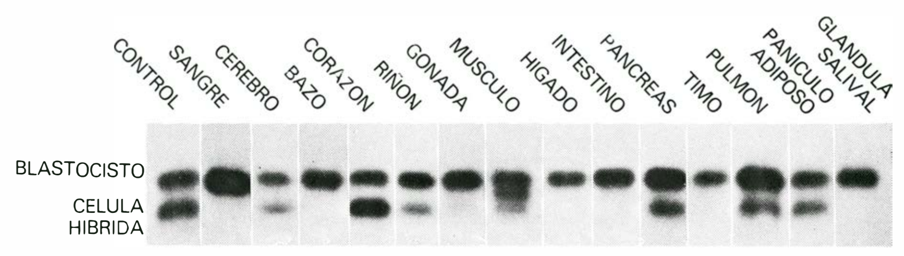
carcinomatosas embrionarias, no del trofoblasto ni del tejido uterino. Aparentemente, pues, la estirpe celular maligna conserva sus propiedades neoplásicas si se deja a su antojo; vuelve a la normalidad sólo cuando está estrechamente asociada a células embrionarias normales. De momento no sabemos qué indicaciones hacen que una célula, antes maligna, participe en el desarrollo normal.

En una cepa consanguínea de ratones designada por LT, alrededor de la mitad de las hembras desarrollan teratomas ováricos. Estos tumores estrafalarios surgen de óvulos que por alguna razón desconocida son activados partenogenéticamente en el ovario y, sin fertilización, se dividen y dan lugar a embriones jóvenes, entonces se desorganizan y forman teratomas más que fetos. Ocasionalmente un tumor ovárico puede ser convertido en un teratocarcinoma trasplantable por inyección subcutánea en un ratón adulto de la misma línea genética, y estos tumores se pueden someter a análisis experimentales. ¿Era el crecimiento neoplásico de los tumores ováricos el resultado de cambios genéticos estables o eran estas células malignas, como las de los teratocarcinomas derivados del embrión, capaces de volver a la diferenciación normal?

Inyectamos células teratocarcinomatosas ováricas individuales en blastocistos marcados genéticamente de una cepa de ratón distinta y colocamos los blastocistos inyectados en el útero de madres adoptivas. Los trasplantes dieron lugar a diversos ratones quiméricos normales con participaciones derivadas de tumor en el pelaje y en todos los órganos principales. Una hembra quimera resultó tener en sus ovarios óvulos funcionales que se habían originado a partir de las células teratocarcinomatosas inyectadas. Cuando estos óvulos fueron fertilizados, dieron lugar a una camada sana, a ratones normales cuya "madre genética" era un tumor. Los resultados demostraron que las células teratocarcinomatosas femeninas, como sus complementarias masculinas, pierden sus propiedades malignas en un ambiente embrionario y se diferencian normalmente en tejidos adultos, y que en raros ejemplos los genes de las células tumorales pueden incluso ser transmitidos a generaciones sucesivas. Por tanto, es poco probable que la transformación neoplásica que produce teratocarcinomas ováricos sea el resultado de una deficiencia o de una alteración en la composición genética del óvulo.

En apoyo de esta idea encontramos





QUIMERA DE CELULAS HIBRIDAS mostrando un pelaje negro (de la cepa blastocisto) con manchas blancas derivadas de las células híbridas ratón-humanas inyectadas. La variante cepa blastocisto y la variante célula híbrida del enzima glucosa-fosfato isomerasa en la quimera se separan por electroforesis en gel de almidón. Las dos variantes se desplazan a distancias diferentes en un campo eléctrico, (*bandas de control, izquierda*). La variante célula híbrida de desplazamiento más lento (*bandas inferiores*) está presente en siete tejidos. En el músculo esquelético las dos variantes forman un heterodímero, una molécula enzimática cuya presencia atestigua la actividad en las quimeras del enzima híbrido.

que los óvulos de la cepa LT pigmentada que habían empezado a dividirse partenogenéticamente y habían alcanzado el estadio de ocho células podían ser extraídos del oviducto y agregados a embriones normales de ocho células procedentes de una cepa albina consanguínea. Cuando dichos agregados se implantaban en madres adoptivas, se desarrollaban diversos ratones quiméricos normales (pigmentados y albinos). Cuando una hembra quimera era emparejada con un macho albino, daba a luz a descendencia tanto albina como pigmentada. La progenie pigmentada podía sólo derivarse de óvulos que descendían de embriones partenogenéticos de ocho células. Concluimos que las aberraciones del desarrollo que producen tanto los teratocarcinomas ováricos como testiculares están causalmente relacionados más con cambios en la función que en la estructura de los genes.

Deberíamos mencionar que los datos de un tipo algo diferente de experimento han tendido a contradecir nuestro hallazgo de reversión completa. Las líneas celulares del teratocarcinoma han sido mantenidas en cultivos de laboratorio más que en los animales vivos y se ha demostrado que son capaces de diferenciarse en muchos tipos de tejidos. En el laboratorio de Richard L. Gardner de la Universidad de Oxford, Virginia E. Papaioannou y sus colegas inyectaron en blastocistos estas células teratocarcinomatosas cultivadas (entre 20 y 40 células por blastocisto), implantaron los blastocistos en madres adoptivas y obtuvieron varios ratones quiméricos. La mayoría de estas quimeras desarrollaron tumores unos pocos meses después de nacer. Creemos que los tumores pudieran haber resultado del hecho de que las numerosas células inyectadas no fueron capaces de integrarse plenamente durante las primeras fases del desarrollo. Además, en el transcurso de su cultivo en un medio de laboratorio las células tumorales podrían haber acumulado anomalías cromosómicas y de otro tipo que no estaban necesariamente implícitas en el programa genético o de desarrollo de las células carcinomatosas embrionarias originales.

La abrumadora preponderancia de datos de la investigación del cáncer a través de los años ha parecido justificar la suposición de que la transformación maligna es un permanente cambio de estado: "En cuanto una célula se convierte en cancerosa, lo será por siempre". Recientes datos sobre investigación de tumores, tanto en plantas como en animales, sugieren que el dogma no es infalible, por lo menos para ciertos tumores. Cabe pensar que la transformación hacia el estado maligno no siempre es el resultado de mutaciones estables en la estructura de los genes sino que algunas veces lo es de cambios reversibles no mutacionales de la expresión genética, que dan lugar a anomalías en el curso de la diferenciación y, por ende, al crecimiento neoplásico.

Esperamos explotar el sistema teratocarcinomatoso para seguir la pista del origen y causas de la transformación maligna e investigar los mecanismos subyacentes a las interacciones celulares que a veces conducen a una reversión del estado maligno. Los teratomas pueden no ser los únicos en su capacidad de volver a la normalidad. Nuestra técnica para introducir una célula teratocarcinomatosa en un embrión de ratón y ensayar todas sus posibilidades en el animal vivo puede ser aplicable a otras células neoplásicas. Si es así, quizá podamos determinar si células tumorales más especializadas han sufrido cambios genéticos estables o son aún flexibles con respecto al potencial de desarrollo y pueden, por lo menos hasta cierto punto, integrarse en los tejidos normales.

La combinación de nuestro procedimiento de inyección de un blastocisto con la técnica de hibridación celular ha abierto recientemente una nueva línea de investigación sobre la diferenciación. La técnica de hibridación es valiosa para la identificación de determinados enzimas y de otros productos genéticos y relacionarlos con los genes de cromosomas concretos; la inyección de células tumorales en blastocistos permite introducir células híbridas en animales vivos y con ello conseguir un bioensayo de la actividad de aquellos genes.

Hemos emprendido experimentos combinados de este tipo en colaboración con Carlo M. Croce, del Instituto Wistar de Anatomía y Biología en Filadelfia. En su laboratorio, se adaptaron las técnicas destinadas a establecer líneas variadas de cultivos celulares derivadas de teratocarcinomas de ratón para obtener células teratocarcinomatosas que eran deficientes en un enzima determinado, la timidina kinasa (TK). Se unieron o bien con células tumorales humanas o bien con células tumorales de rata deficientes en otro enzima, la hipoxantinafosforribosil transferasa (HPRT). Sólo las células híbridas interespecíficas fueron capaces de crecer en un medio especial en el que murieron ambos tipos celulares paternos [véase "La genética del cáncer humano", por Carlo M. Croce e Hilary Koprowski; INVESTIGACION Y CIENCIA, abril, 1978].

En el medio selectivo, las células hí-

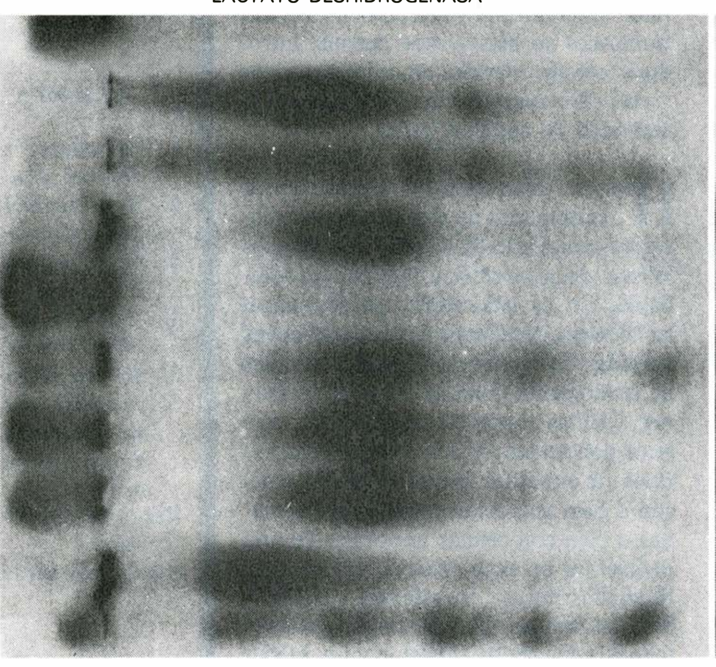
bridas perdieron la mayor parte de sus cromosomas humanos o de rata, pero retuvieron el cromosoma extraño con el locus genético para TK, que era necesaria para la supervivencia. Los genes para TK y para el enzima galactokinasa están ligados (ambos están en un solo cromosoma) en el hombre, en la rata y en el ratón. La forma humana y de la rata de la galactokinasa puede distinguirse fácilmente de la forma del ratón por electroforesis, que proporciona un marcador bioquímico para detectar la presencia del producto genético extraño y con ello demostrar la expresión normal de los genes extraños en las células híbridas. La persistencia de varios cromosomas de rata en las células híbridas de ratón-rata nos permitió buscar un número de formas enzimáticas rata específicas, haciendo posible un análisis más extenso de la expresión genética. Ambos tipos de células interespecíficas conservaban sus propiedades malignas, formando grandes tumores cuando eran implantadas debajo de la piel de ratones "desnudos" (que tenían su inmunidad alterada y aceptarían por tanto el injerto de tejido extraño).

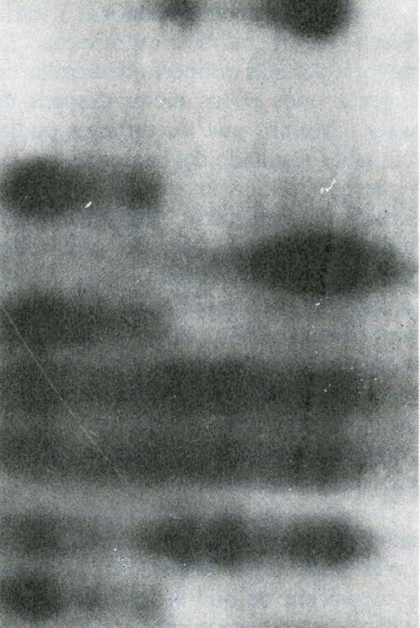
Decidimos explorar el potencial de células tumorales híbridas en un ambiente que facilitara la diferenciación normal. Junto con Peter O. Hoppe, del Jackson Laboratory, y nuestros colegas de la Universidad de Ginebra trasplantamos células híbridas individuales a blastocistos marcados genéticamente, desarrollamos los blastocistos en madres adoptivas y obtuvimos diversos ratones quiméricos sanos en los que podía demostrarse que las células tumorales híbridas habían contribuido en el pelaje y en los diversos órganos internos. Aparte de un tumor hepático, ninguno de los tejidos derivados de tumor mostraba anormalidad estructural alguna. Aparentemente las células híbridas malignas se habían diferenciado de un modo normal y estaban integradas en la nueva generación de ratones durante el desarrollo.

En los ratones quiméricos también eran detectables productos genéticos extraños. La forma humana de galactokinasa se encontró en el corazón de una quimera y en los riñones de otra. Las formas rata de nueve enzimas diferentes fueron halladas en diversos órganos de tres quimeras adultas. El hecho de que algunos productos genéticos de rata descubiertos en los animales no se detectaran en células híbridas en el medio de cultivo y de que las quimeras producían también heteropolímeros (moléculas híbridas compuestas tanto de formas rata como ratón de ciertos enzimas) demostraba que los genes extraños se estaban expresando funcionalmente en los animales adultos. La síntesis de los variantes de enzimas que se encuentran sólo en adultos indicaron, además, que la expresión genética de rata continuaba siendo modulada mientras se desarrollaba el ratón quimérico. Ahora estamos extendiendo el análisis a otros genes en un esfuerzo por descubrir en qué estadio del desarrollo se expresan y cómo influyen en la diferenciación y la enfermedad, y, por último, para comprender los mecanismos que controlan la expresión genética.

Los 25 años de investigación con teratomas de ratón inducidos experimentalmente han proporcionado múltiples intuiciones sobre el origen, la genética y las propiedades de desarrollo de estos insólitos tumores. La sorprendente observación de que la estirpe celular maligna de los teratocarcinomas contribuye a la diferenciación normal de tejidos en ratones quiméricos ha restado atención al hecho de que el estado neoplásico puede a veces ser invertido. Ahora que podemos hibridar células carcinomatosas embrionarias y por ende hacerlas portadoras de material genético extraño para su integración en un excelente sistema de bioensayo –los tejidos de un animal en desarrollo– debería abrirse el camino para nuevos avances en el estudio de la diferenciación de los mamíferos y del proceso de transformación neoplásica y su reversión.







ENZIMAS DE RATA detectados en extractos de los órganos de tres ratones quiméricos (*A*, *B*, *C*), derivados de blastocistos inyectados con células híbridas ratón-rata. Las cinco primeras bandas de electroforesis empezando por arriba muestran los modelos de migración de dos enzimas, lactato deshidrogenasa (LDH) y glicerofosfato deshidrogenasa (GPD), en el hepatoma de rata y en las células teratocarcinomatosas de ratón, en las células híbridas y en el hígado normal de ratón y de rata. Las cinco bandas siguientes documentan la presencia de variantes de enzima de rata en el hígado de cada una de las tres quimeras y en el intestino y riñones de la quimera *A*. La actividad de los genes rata durante el desarrollo del ratón es atestiguada por diversos resultados: hay actividad GPD en las quimeras; hay heteropolímeros rata-ratón (por ejemplo GPD en el hígado de *A* y *B* y en el intestino de *A*); existe una forma adulta de LDH de rata (en el hígado de *A*, *B* y *C* y en los riñones de *A*), no detectable en células híbridas.



La osteomancia china

Los aristócratas de la dinastía Shang de hace 3000 años gustaban de solicitar el consejo de sus antepasados. Las preguntas, grabadas sobre hueso o sobre concha de tortuga, constituyen las claves para los orígenes de la civilización china

Hung-hsiang Chou

De entre las grandes civilizaciones antiguas del mundo, la única que pervive en una forma reconocible es la civilización de China. Dos son los elementos que han contribuido a esta longevidad: un sistema de escritura, que puede ser remontado hasta una fecha superior a los 6000 años, y un modelo de creencias religiosas que subrayan el culto a los antepasados y una reverencia hacia el pasado en general. Podría parecer que no hay coincidencia en que ambos elementos estuviesen íntimamente unidos hace ya unos tres milenios, en la última parte del primer gran período dinástico de China. En dicho período, la dinastía Shang, comenzó a emplearse la forma madura más temprana de la escritura china con un fin religioso: para solicitar consejo sobrenatural mediante adivinación.

La técnica adivinatoria de los siglos finales de la dinastía Shang exigía la preparación especial de los "huesos mánticos u oraculares", por lo general la escápula de un buey o el plastrón (la parte ventral del caparazón) de una tortuga, de modo que el ulterior calentamiento pudiera formar grietas sobre la superficie del material. Después de que este hueso mántico había sido preparado, el adivino grababa sus preguntas sobre su alisada superficie, exponía el hueso (o la concha) al calor y, a partir de las grietas que aparecían, juzgaba si las respuestas augurales a sus preguntas eran o no favorables.

Hoy en día resulta difícil creer que esta primitiva escritura china fuera desconocida incluso para los naturales hace poco menos de un siglo. Hubo que esperar hasta 1899 para que un achacoso estudioso de Pekín se topara accidentalmente con ejemplos de este tipo de inscripciones Shang. Su nombre era Wang y su parcela de estudio la etimología; y debemos el descubrimiento de las inscripciones a su fe en la medicina china tradicional. Entre las listas de remedios populares aplicados desde hace tiempo en China se halla uno que prescribe "huesos de dragón". Se trata de variadas porciones de hueso y concha; la mayor parte de las mismas son antiguas y algunas proceden, realmente, de huesos fósiles. Tienen en común el hecho de que uno de sus principales componentes es el calcio. El calcio, reducido a polvo, constituye un eficaz coagulante de la sangre, de modo que no es sorprendente que con frecuencia se aplicara a los cortes hueso de dragón pulverizado.

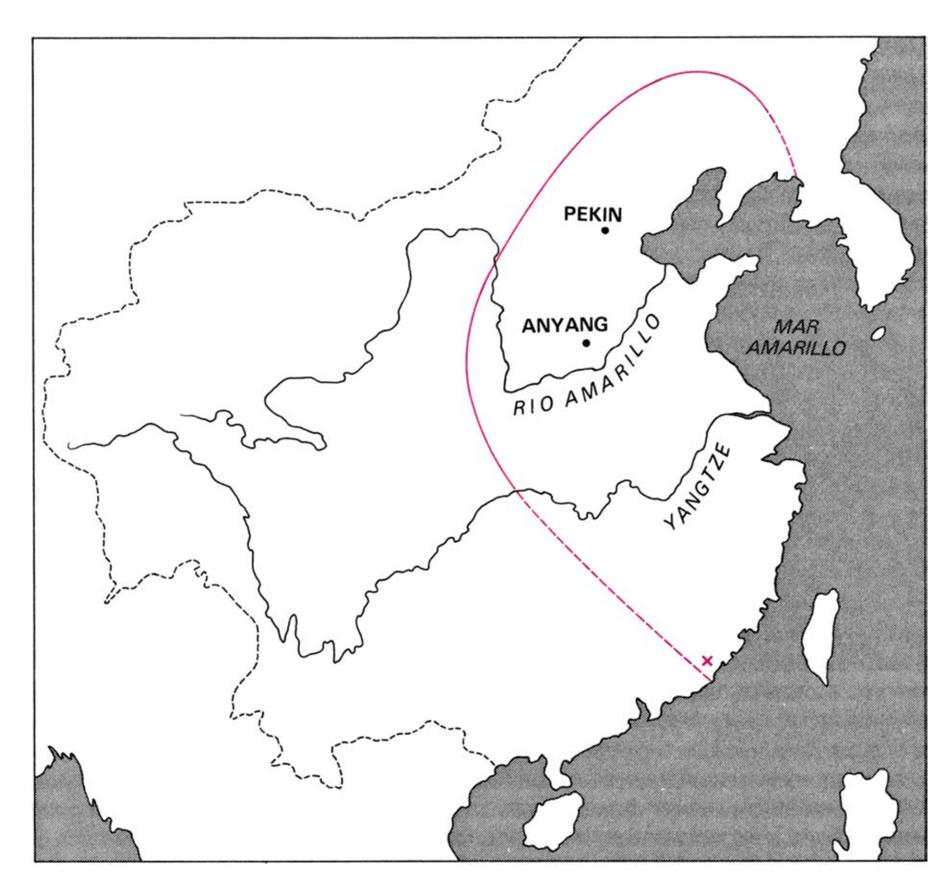
Para la enfermedad de Wang su médico de cabecera le prescribió, entre otras cosas, hueso de dragón. El criado de Wang trajo de una farmacia un paquete de medicinas populares, incluidas unas pocas piezas de hueso. Al examinar Wang su compra, quedó sorprendido al ver que algunos de los huesos aparecían inscritos con lo que parecía ser una forma muy primitiva de la escritura china. Inmediatamente volvió a mandar a su servidor a la farmacia, con instrucciones de adquirir todos sus huesos de dragón, y, de esta forma, entre los huesos medicinales, se volvieron a descubrir los huesos mánticos de la antigua dinastía Shang.

Digo que se volvieron a descubrir, porque los relatos de historia china primitiva mencionan de hecho este sistema Shang de adivinación. No obstante, hasta la adquisición de Wang, nadie había identificado los huesos de dragón, esporádicamente inscritos, como parte de los artefactos Shang. Ahora bien, según comenzó a difundirse la noticia del hallazgo de Wang, los coleccionistas profesionales de antigüedades chinas desarrollaron una nueva pasión. Las farmacias fueron despojadas súbitamente de sus provisiones de huesos inscritos, comenzaron a aparecer falsificaciones y los elevados precios ofrecidos por los coleccionistas condujeron a una excavación ilegal en una fuente reconocida de antigüedades Shang: el área de Anyang en la provincia de Honan, unos 500 kilómetros al sur de Pekín.

El gobierno chino detuvo este saqueo particular de tumbas y los arqueólogos, bajo la dirección de la Academia Sinica, el principal organismo estudioso de la nación, excavaron quince yacimientos Anyang independientes entre 1928 y 1937, momento en que la invasión japonesa de China detuvo temporalmente los trabajos. Durante esta campaña de diez años, los excavadores exhumaron un total de cerca de 20.000 huesos mánticos. Esta enorme colección resultó ser la fuente de material más importante para los estudios de los huesos mánticos de las décadas siguientes.

Por los mismos años en que los trabajos en Anyang estaban en marcha, numerosos estudiosos extranjeros abordaron en China el estudio de las prácticas adivinatorias Shang y embalaron hacia sus países de origen sus propias colecciones de huesos mánticos. Por ejemplo, los primeros huesos mánticos que llegaron a los Estados Unidos constituyen ahora parte de la colección Couling-Chalfant del Carnegie Institute Museum de Pittsburgh. El norteamericano Frank H. Chalfant fue también el primer sinólogo occidental que publicó estudios sobre las inscripciones osteománticas. También se sintieron atraídos por este nuevo campo de estudio investigadores del Canadá, Inglaterra, Francia, Alemania, la Unión Soviética y Japón.

INSCRIPCION OSTEOMANTICA en la fotografía de la página opuesta. Dicha inscripción constituye una de las diversas grabadas sobre escápula de oveja. Se trata del espécimen n.º 974 de la colección Couling-Chalfant de huesos mánticos Shang, del Carnegie Institute Museum de Pittsburgh. El hueso de oveja fue exhumado en las proximidades de Anyang, la última capital Shang. La escritura china aparece en el estilo de la última dinastía Shang. El agüero se hizo el trigésimo cuarto día. Las preguntas emparejadas son: El trigésimo séptimo día, ¿lloverá? El trigésimo séptimo día, ¿no lloverá?



REINO SHANG, hacia finales del segundo milenio a.C.; se extendía desde lo que hoy es la provincia de Liaoning de China septentrional hacia el oeste hasta lo que es, en la actualidad, la provincia de Shensi y desde allí, hacia el sur, más allá del río Yangtze. La frontera meridional (*línea discontinua*), al igual que la frontera sobre el mar Amarillo al norte, no está bien definida. Un descubrimiento en la provincia de Kwangtung (*x*), revela que la autoridad de los Shang alcanzaba 1200 km al sur de Anyang.

No es necesario decir que muchos estudiosos chinos llevaron a cabo una labor de iniciación en este campo. Entre éstos se cuenta Kuo Mo-jo, quien, hasta su reciente defunción, era también un preeminente personaje político de la República Popular china, responsable de los asuntos arqueológicos y otras cuestiones culturales. La labor de los sinólogos, tanto en China como en otros países en los años posteriores a la compra de Wang en Pekín, ha dado como resultado la publicación de más de 2000 libros y artículos científicos sobre el tema de los huesos mánticos.

Estos ochenta años de estudio han ampliado considerablemente el conocimiento de las primitivas prácticas adivinatorias chinas. Por ejemplo, se sabe ahora que los adivinos Shang no fueron los primeros en calentar escápulas bovinas hasta que se agrietaran e interpretar después de forma mántica las grietas. La práctica se remonta hasta la época neolítica, a finales del quinto milenio a. C.

Los granjeros neolíticos de China estaban familiarizados por entonces con las escápulas de bueyes desde hacía por lo menos 2000 años: las empleaban como palas. Los adivinos neolíticos no escribían sus preguntas sobre los huesos mánticos. Probablemente, la razón estribaba en que el número de caracteres escritos creados hasta esa fecha era reducido. (Los hallazgos arqueológicos indican un total de unos 40.) Los caracteres parecen haber sido en su mayor parte numerales o nombres de clanes. Con estas limitaciones, es muy difícil articular preguntas.

Por ejemplo, todo lo que puede constituir la formulación escrita neolítica más compleja descubierta hasta el momento aparece inciso en una olla de hace unos 5000 años exhumada en Ta Wen K'uo, un yacimiento arqueológico de la provincia de Shantung. La inscripción combina tres caracteres que, de arriba abajo, parecen representar el sol, el fuego y las cimas de las montañas. Podría traducirse de una forma literal esta inscripción como "un fuego bajo el sol y en la cima de las cumbres de los montes". Una traducción más libre podría ser "calor extraordinario" o incluso "fuego de broza". En cualquier caso, el repertorio escrito chino de época neolítica era bastante limitado.

La práctica neolítica de adivinación no escrita siguió vigente y se hizo aún más compleja en el obscuro período que precede a los Shang: la dinastía Hsia, que tradicionalmente se fecha desde el siglo XXI al XVI a.C. Muchos estudiosos creían que los Hsia eran sólo una dinastía legendaria, pero investigaciones arqueológicas de estos últimos años han descubierto cierto número de yacimientos Hsia.

Durante la época Shang, los adivinos comenzaron a escribir sus preguntas sobre una cara del hueso mántico, tras haber preparado la cara opuesta del hueso para asegurar que aparecieran las grietas. Los adivinos, gradualmente, fueron encontrando también ingratas las escápulas, que eran de forma irregular y difíciles de preparar para la inscripción. Un plastrón de tortuga resultaba más simétrico, más atractivo a la vista y más fácil de manejar. Hacia el momento en que la adivinación osteomántica había alcanzado su cénit, durante los últimos tres siglos de los Shang, la concha de quelonio había reemplazado al hueso de buey como material principal para la inscripción. No obstante, ello no quiere decir que desaparecieran los demás tipos de huesos mánticos. Las escápulas bovinas continuaron en uso, como también las de cabra y oveja, el espaldar (concha superior) de tortuga, fragmentos de cuerna e, incluso, huesos craneales humanos.

En el culmen de su esplendor, la China de los Shang fue una de las grandes naciones del mundo. Su territorio se extendía desde la provincia de Shensi, al oeste, sin interrupción, hasta el mar Amarillo y desde la provincia de Liaoning, en el norte, hasta más allá del río Yangtze, en el sur. El último de los reyes Shang, sin embargo, no parece haber sido merecedor de su legado: su afición por la bebida contribuyó a su derrocamiento en el siglo XII a.C. Sus sucesores, los reyes de la dinastía Chou, eran tipos robustos y rudos. Hay un punto de ironía en el hecho de que la inestable era Chou (desde el siglo XII al III a.C.) fuera la edad de oro de la filosofía china. Confucio, Mencio, Lao Tse y el menos famoso Chuang Tse florecieron todos en este período. Hasta época bien reciente se creyó que la adivinación pasó de moda con el establecimiento de los Chou. Descubrimientos recientes en la provincia de Shensi, en la que estaba situada la capital Chou desde el siglo XII hasta el primer tercio del VIII a.C., demuestran, empero, que la adivinación mediante huesos mánticos continuó bajo los nuevos señores de China, al menos hasta el año 1000 a.C. No mucho después, la práctica fue abolida por razones desconocidas.

No obstante, el legado osteomántico sigue siendo enorme. Es imposible calcular cuántos miles de huesos y conchas

inscritas pueden haber sido reducidos a polvo con fines medicinales y cuántas veintenas o cientos están ocultos aún en colecciones privadas, inaccesibles a los estudiosos. Mis propias investigaciones y cálculos recientes publicados en China indican que el número de especímenes inscritos recuperados sólo de los yacimientos de Anyang alcanza un total de unos 100.000. Se afirma que el nuevo descubrimiento Chou aporta 15.000 huesos mánticos más al total general. El estudio de estos artefactos ocupará a los estudiosos durante generaciones.

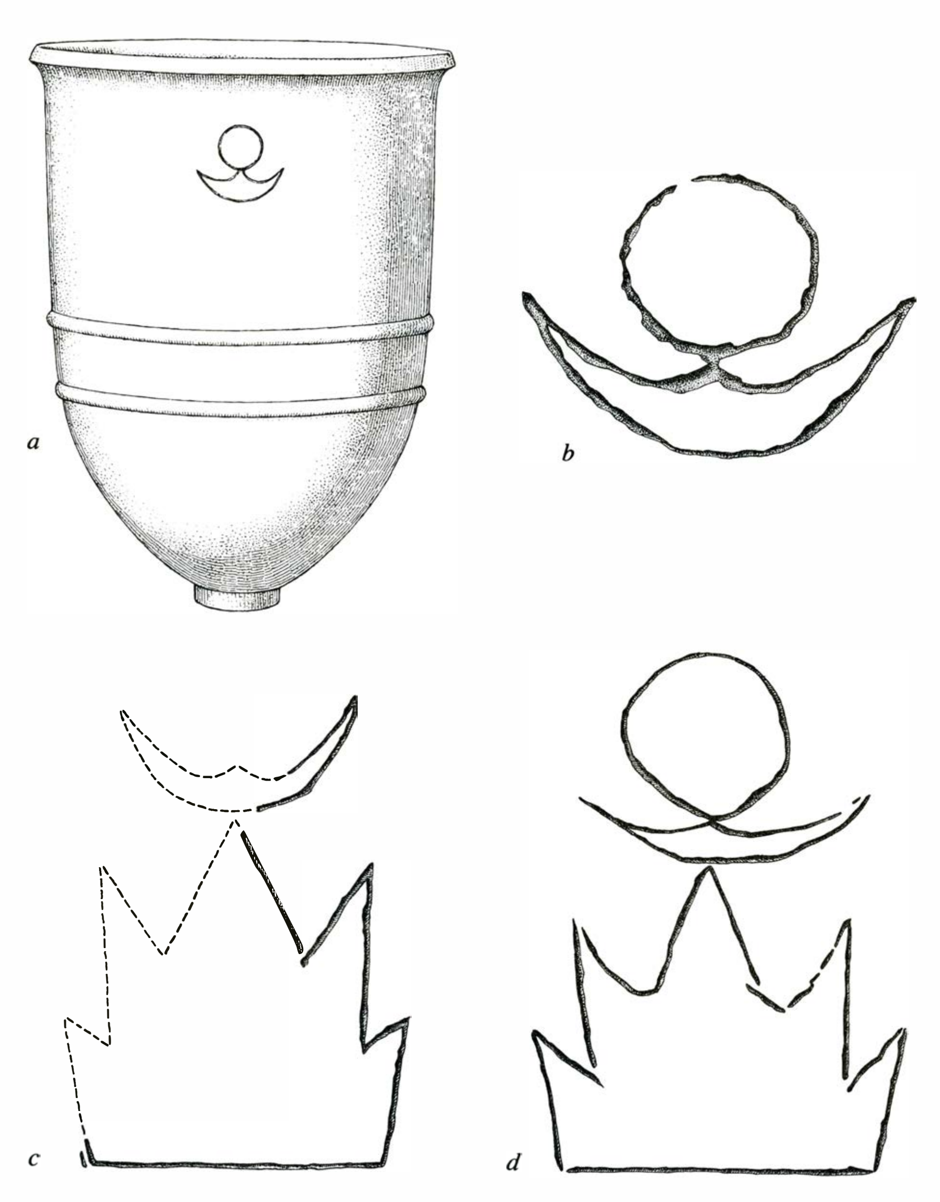
En toda discusión sobre los huesos mánticos surgen al punto dos cuestiones. En primer lugar, ¿cómo se preparaban para la adivinación estas escápulas y conchas de tortuga? En segundo lugar, ¿qué tipo de preguntas se inscribían? He llevado a cabo experimentos que arrojan cierta luz sobre la primera de estas cuestiones.

Trabajando con escápulas de bueyes, he intentado "alisarlas" y preparar, por lo demás, los huesos para recibir una inscripción. Mi instrumental consistía en una sierra metálica moderna, provista de una hoja desmontable de acero de 17 centímetros de largo y 25 milímetros de ancho. Los salientes superfluos de una escápula son la espina del reverso y las partes superiores en torno a la fosa escapular. (El anverso del hueso es por naturaleza liso.) Desembarazar un solo hueso de estos salientes me llevó cuatro horas de trabajo y un par de hojas de sierra rotas.

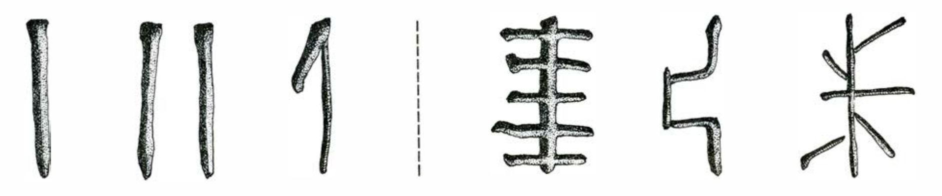
Para grabar una inscripción sobre el anverso del hueso trabajé con un buril moderno de acero inoxidable. Aunque no carezco de pericia para escribir chino, encontré casi imposible conseguir el tipo de grabado que se ve con más frecuencia en los huesos mánticos. No intenté, ni siquiera, hacer los pares de hoyos (uno redondo y somero y el otro en forma de *V* y más profundo) que los adivinos Shang tallaban sobre el reverso del hueso. Si yo encontré mi tarea tan difícil, trabajando con instrumentos de acero, ¿cuánto más arduo debió haber sido para los Shang, que sólo tenían cuchillos o sierras de bronce y punzones de terso jade?

¿Habían utilizado, quizá, los adivinos sólo huesos frescos? Lo intenté así y no hallé más fácil la tarea. ¿Quizá habían ablandado los huesos cociéndolos? También lo intenté con el mismo resultado negativo. ¿Habían ablandado los huesos de alguna otra forma? Después de luchar a brazo partido con esta cuestión por algún tiempo, intenté empapar el hueso de buey y la concha de tortuga en vino o en vinagre, antes de ponerme a la tarea. Los huesos y las conchas tratadas de esta forma resultaron ser mucho más fáciles de manejar. ¿Era así como los adivinos Shang trataban previamente sus huesos mánticos? Es probable, pero hace falta aún más investigación, antes de que sea posible una conclusión definitiva. ¿Qué líquido se empleaba? ¿Se trataba de vino de arroz o de alguna otra clase de vino? ¿Era vinagre? Y si lo era, ¿de qué tipo? Estos estudios podrían aclarar también las primeras fases de la química china.

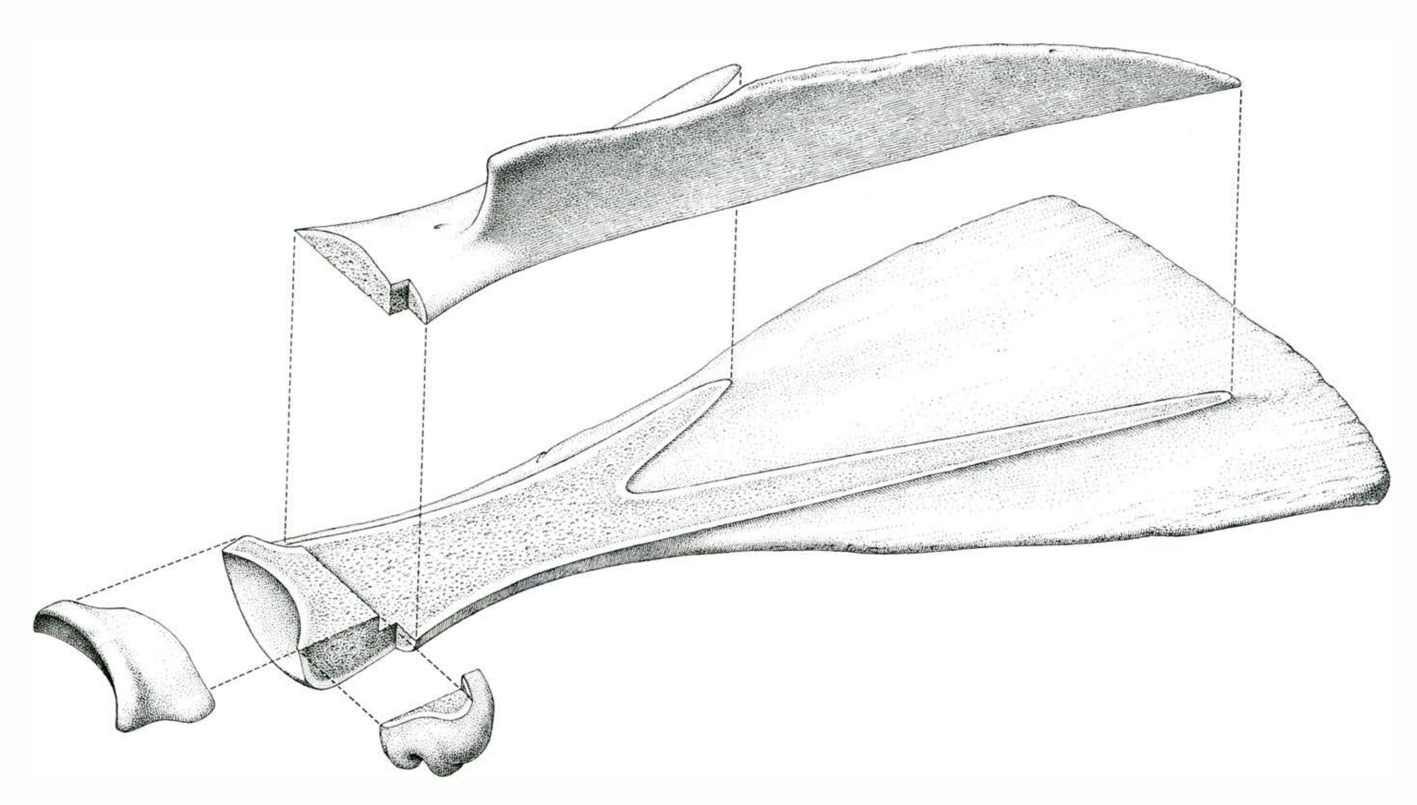
Los pares de hoyos, que los adivinos Shang tallaban en la superficie del reverso de los huesos mánticos, cumplían un fin muy práctico. La respuesta



CERAMICA NEOLITICA del cuarto milenio a.C., procedente de yacimientos de la provincia de Shantung; porta pictogramas incisos representativos de algunos de la escritura china más antigua conocida. Cerca del borde de una vasija (*a*), hay dos pictogramas repetidos en ampliación a la derecha (*b*): un círculo en la parte superior, que representa el sol, y, debajo de éste, una media luna con tres cúspides, que representa el fuego. Las incisiones sobre un tejuelo, procedente de un segundo yacimiento, sitúan el pictograma del "fuego" sobre otro pictograma con cinco cimas, que representa una montaña (*c*). Aún otra incisión vascular (*d*) dispone estos tres mismos pictogramas: "sol" sobre "fuego" sobre "montaña". La inscripción de tres caracteres puede interpretarse como "calor extraordinario".



OTROS CARACTERES NEOLITICOS, inscritos sobre cerámica procedente de Pan P'o, en la provincia de Shensi, son anteriores y más crípticos que los pictogramas de Shantung. Los tres de la izquierda han sido interpretados como cifras; los tres caracteres más complicados de la derecha pueden representan los "tótems" del clan o los nombres de las tribus. No llegan a 40 los caracteres neolíticos.



UNA ESCAPULA DE BUEY fue convertida en hueso mántico al cortarle parte del final de la fosa (*izquierda*) y la larga espina saliente (*arriba*) del dorso de la escápula. Los adivinos Shang tallaban después parejas de hoyos, uno profundo y otro somero, en la superficie del reverso de la escápula.

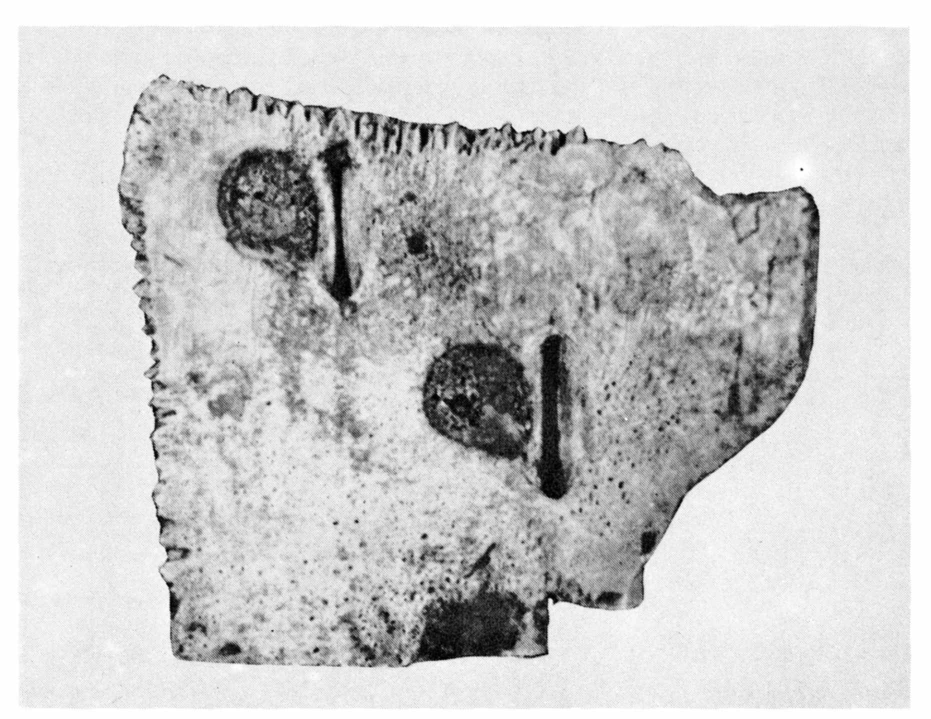
PLASTRON DE UNA TORTUGA, convertida en hueso mántico al cortarle el puente que conecta la cubierta superior y la ventral (*a*). Las parejas de hoyos, en número de unos 30, se tallaban en el interior de la concha. Una sección longitudinal (*b*) muestra la profundidad de cuatro pares.

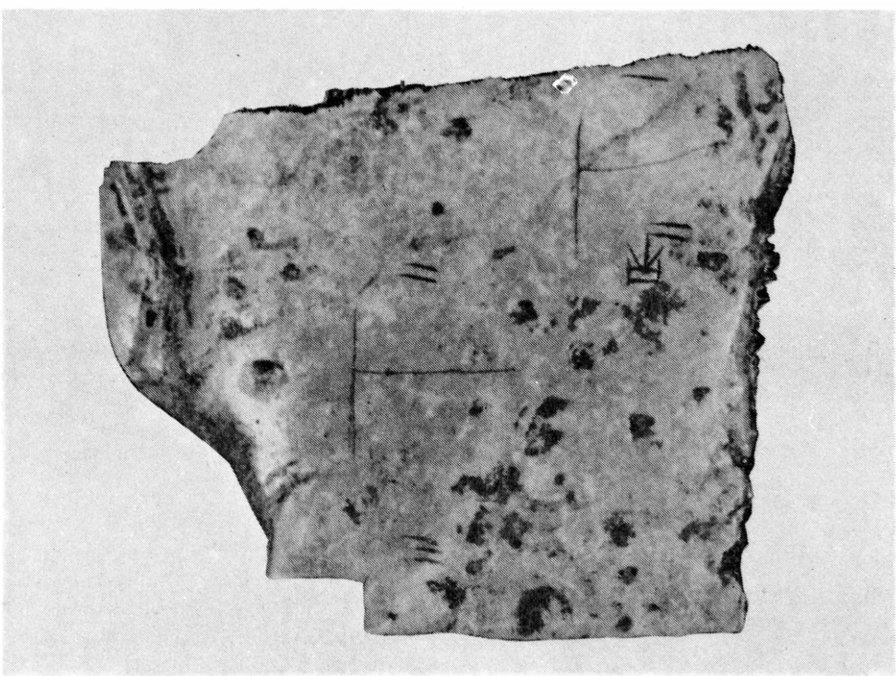
augural, que los adivinos esperaban recibir, consistía en un par de grietas que se asemejaran al carácter de escritura "pu", esto es, una línea vertical unida hacia su mitad, por la derecha, por otra línea más o menos perpendicular. Este sencillo carácter todavía existe en la escritura china: su significado es el de "adivinación" y su pronunciación (algo parecido al sonido ¡bo! en español) es considerada por algunos estudiosos como si imitara el chasquido producido por un hueso mántico, cuando se agrieta por la aplicación de calor.

La talla vertical en forma de *V* de cada par de hoyos garantizaba la aparición del elemento vertical de "pu". El puro azar hacía su aparición en el proceso mántico, respecto a si la grieta perpendicular, garantizada por la presencia de un hoyo circular aledaño a la talla vertical, era suficientemente perpendicular. Si la grieta perpendicular estaba más o menos en ángulo recto con la grieta vertical, esto es, dentro de los 20 grados de un 90 grados exacto, se consideraba que la respuesta augural a la pregunta del adivino era afirmativa. Si el ángulo de la grieta no entraba dentro de este abanico de 40 grados (desde los 70 grados a los 110), la respuesta era negativa.

Una razón por la que los adivinos Shang pueden haber llegado a preferir el caparazón de tortuga reside en que las divisiones, simétricas por naturaleza, de la concha en láminas o placas ofrecen distintas áreas para la ubicación de los hoyos emparejados. En la práctica, los hoyos se realizaban en números emparejados a ambos lados de la línea central de la concha. Por tanto, sin tener en cuenta la única placa que cabalga la línea central, cada mitad de concha podía contener un buen número de hoyos emparejados. Dado que las preguntas del adivino se presentaban tradicionalmente en forma de cuestiones antitéticas, esto quiere decir que una sola concha de tortuga podía proporcionar respuestas a numerosas preguntas [*véase la ilustración de la página 80*]. Una escápula de buey tenía espacio para un número mucho menor de preguntas dobles.

Los adivinos Shang solicitaban consejos de varias clases. Preguntaban sobre futuros fenómenos naturales como la lluvia, tempestades, nieve y buen tiempo. Pedían también pronósticos sobre cosechas, expediciones de caza, viajes de otro tipo y empresas militares. Interrogaban sobre la conveniencia de determinados tipos de ceremonias religiosas, el resultado probable de un parto, el curso venidero de enfermedades como el dolor de cabeza y de muelas, e incluso el significado de los sueños. Antes de ofrecer una muestra de dichas inscripciones, le vendrá bien al lector conocer algo sobre el estado de la escritura china hacia finales de la dinastía Shang.





LA FINALIDAD DE LOS HOYOS queda demostrada por estas fotografías de la parte anterior y posterior del mismo fragmento de concha de tortuga. Sobre la parte posterior del fragmento de caparazón aparecen dos pares de hoyos (*arriba*); el color obscuro de los hoyos someros es el resultado de la aplicación de calor a dicha área. Sobre la parte anterior del fragmento (*abajo*) se pueden ver dos series de grietas que se producían al aplicar calor al dorso. Cada conjunto de grietas presenta la forma general del carácter "pu", indicando que la respuesta a las interrogantes del adivino, que se grababan sobre la parte anterior de la concha, era favorable. (Ambas fotografías fueron tomadas por el autor.)

Se acostumbra a describir la escritura Shang como "madura". Por "madura" los sinólogos quieren decir que los Shang hicieron uso de los cinco principios por los que puede inventarse una carácter de escritura en la lengua china. El primero y más sencillo de estos principios es lo que se denomina principio pictográfico: el escriba dibuja una representación más o menos realista de un objeto, como, por ejemplo, una tortuga, un árbol o un cuchillo.

El segundo principio se denomina ideográfico o "indicador". Por ejemplo, si el pictograma que significa "cuchillo" es trazado con una marca a su lado, ésta

indica que el significado del ideograma es el de "filo". Igualmente, si se añaden dos puntos en la parte pectoral del pictograma corriente de "mujer", una figura en palotes arrodillada, esto indica que el significado ha sido cambiado de "mujer" a "madre", siendo lo lógico el que una madre alimente al pecho a su bebé.

El tercer principio, llamado compuesto sugerente, se aplica a ideogramas algo más complejos. Por ejemplo, la palabra china actual para "masa" o "masas" (en el sentido de multitud) era escrita por los escribas Shang como el pictograma de la figura de palotes para un hombre repetida tres veces con el pictograma del sol añadido sobre sus cabezas. Evidentemente, a los escribas Shang la representación compuesta de tres personas trabajando al sol sugería una multitud. Igualmente, los Shang rodearon el pictograma del sol con cuatro pictogramas de árbol simplificados para simbolizar un sol poniente al final del día; el compuesto sugerente dio lugar al carácter ideográfico del chino moderno para "atardecer".

El cuarto principio consiste en una variación en la composición de dos o más radicales, como se denominan ciertos ideogramas indicadores. Aquí, uno de los componentes del carácter escrito transmite el significado que se pretende y el otro componente indica cómo se pronuncia dicha combinación. La mayor parte de los 50.000 caracteres de la escritura china moderna fueron formados según este principio.

A modo de ejemplo moderno tomemos el sonido "ch'ing" (el carácter "verde"). Este carácter puede combinarse con el radical "sol" para significar "cielo despejado", con el radical "agua" para significar "agua clara", con el radical "corazón" para significar "sentimiento" o "amor" y con el radical "lenguaje" para significar "por favor" o "invitar". Todos estos compuestos se pronuncian *ch'ing,* aunque con diferentes acentos tonales.

Un buen ejemplo Shang lo proporciona el carácter "chiu", que significa "vino". Es una combinación de dos componentes: un pictograma de una vasija (que se pronuncia "iu") y tres trazos curvos que representan el "agua (corriente)". Estos representan el líquido (vino) dentro de la jarra. El primer componente sugiere el sonido de la palabra; el segundo sugiere el significado.

El quinto principio supone un desarrollo ulterior del cuarto. Es necesario para la creación de caracteres destinados a representar conceptos abstractos, que no pueden ser expresados pictóricamente. El principio es aplicado mediante la búsqueda de un carácter existente, que tenga idéntico sonido que la palabra abstracta. La elección entre los diversos caracteres de sonido similar se basa en la menor probabilidad de confusión en el contexto. Por ejemplo, en época Shang, la palabra que significa "también" se pronunciaba "yi", pero los escribas fueron, en apariencia, incapaces de inventar un carácter abstracto para expresar este importante concepto de "redundancia". Tal como sucedió, el ideograma Shang para axilas, una figura masculina de palotes con un punto bajo cada brazo, se pronunciaba también "yi". "Axilas" y "también" no era probable que se malinterpretaran en el contexto y, de esta forma, se utilizó el "yi" anatómico para representar el "yi" abstracto.

A juzgar por el análisis de las inscrip-



CARACTERES SHANG (*columna de la izquierda*), muchos de los cuales son de naturaleza pictográfica. Los caracteres Shang se hicieron cada vez más estilizados según se fue desarrollando la escritura china de pincel y tinta (*de izquierda a derecha*). Los pictogramas Shang y subsiguientes de las dos primeras filas presentan una tortuga (*primera vista desde arriba*) y ramas y raíces de árboles (*perfil*). Las cuatro filas siguientes muestran cómo los pictogramas pueden ser compuestos en ideogramas. En la fila tercera, dos puntos añadidos al pictograma Shang para "mujer", un perfil de una figura arrodillada, da lugar al ideograma de "madre" (una mujer criando al pecho). En la fila cuarta, el pictograma Shang para "sol" aparece sobre el pictograma para "varón", una figura de pie de perfil repetida tres veces; la combinación forma el ideograma para "masas". En la fila quinta, el pictograma Shang para "sol" aparece rodeado de pictogramas de "árbol" simplificados; el ideograma resultante, que implica una puesta de sol, evolucionó hasta el carácter actual para "atardecer". Finalmente, cuando el pictograma para "cuchillo" (*primero y tercero*) tiene añadida una marca (*segundo y cuarto*) pasa a ser el ideograma que representa "filo de cuchillo". El par de la izquierda lo constituyen caracteres osteománticos; el de la derecha son tipos chinos modernos. El vocabulario Shang constaba de 4000 caracteres.

ciones osteománticas disponibles en la actualidad, el vocabulario Shang constaba de unos 4000 caracteres, y la mayor parte de los mismos fueron inventados de acuerdo con los cinco principios que he esbozado. La mayoría de los caracteres representa nombres, pero también están representadas cinco de las otras siete partes de la oración del español (pronombres, verbos, adverbios, adjetivos y preposiciones). Las sencillas oraciones, que escribían los escribas Shang, eran de una estructura gramatical semejante a la del inglés actual. La oración básica consta de un sujeto, un verbo y un objeto, si bien la oración puede experimentar variaciones retóricas. Un asiento mántico consta de dos o tres oraciones. Las dimensiones medias de la inscripción van desde los 10 a los 15 caracteres; muy esporádicamente se ha comunicado el hallazgo de inscripciones de más de 50 caracteres.

El par de preguntas antitéticas, que forman la inscripción osteomántica típica, se dirigían a algún antepasado, masculino o femenino, o algún otro tipo de ser sobrenatural. La propia ceremonia mántica seguía a la inscripción de las preguntas sobre el anverso del hueso o concha. El hueso mántico se daba la vuelta después para exponer la superficie del reverso y se aplicaba calor a las tallas redondas y someras apropiadas. Para este fin, puede haberse utilizado una barra de bronce calentada, pero las marcas chamuscadas sugieren que el instrumento era con frecuencia un palo ardiendo o un trozo candente de carbón. En cualquier caso, la aplicación del calor no sólo hacía que las tallas en forma de *V* contiguas produjeran grietas verticales sobre el anverso del hueso mántico, sino que también motivaba que las tallas someras produjeran las grietas aproximadamente horizontales que acompañan a aquéllas.

He aquí algunos ejemplos de preguntas emparejadas de los adivinos:

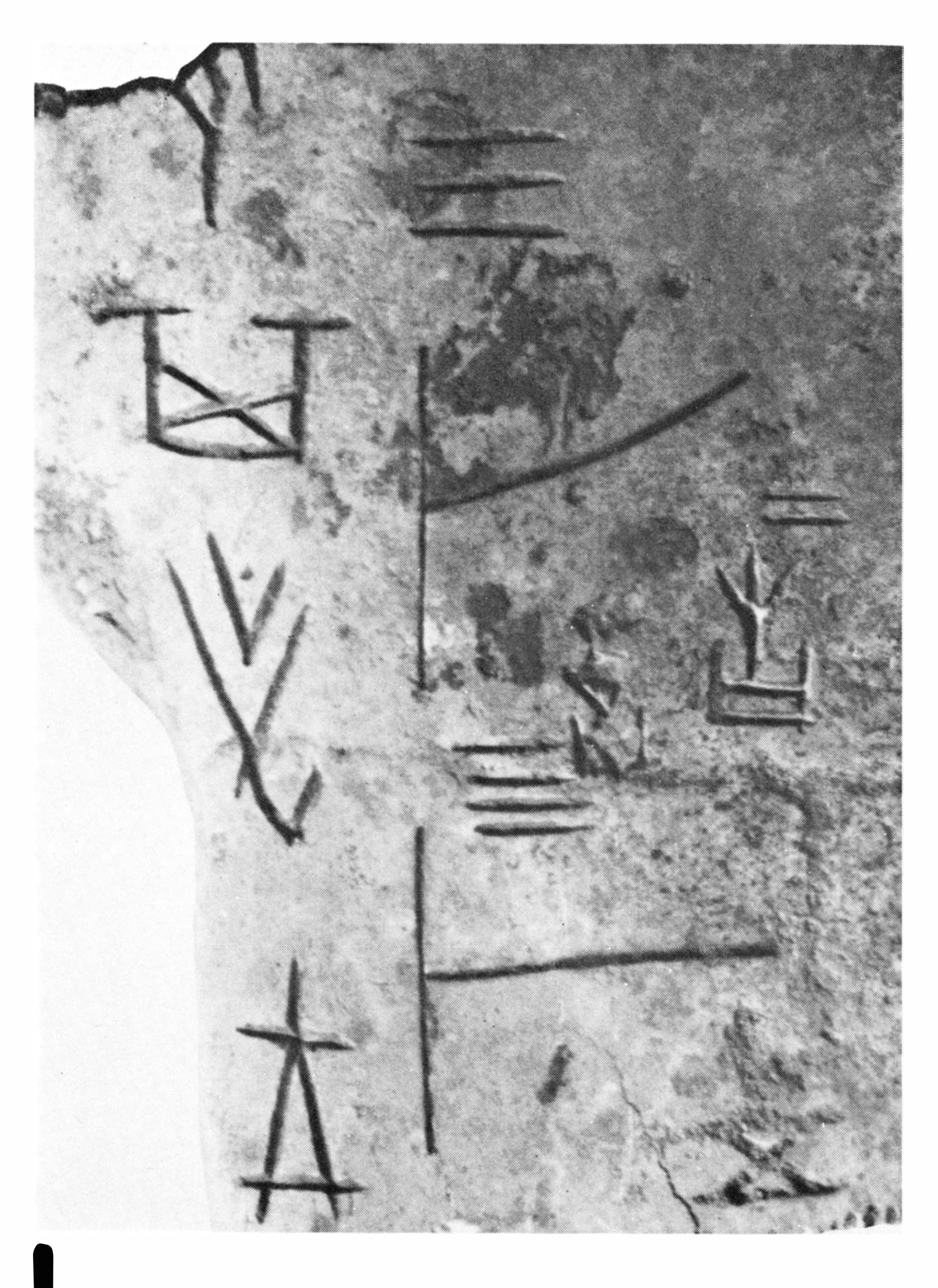
El décimo quinto día, el Adivino Cheng pregunta: ¿Lloverá mañana, el día décimo sexto? El décimo quinto día, el Adivino Cheng pregunta: ¿No lloverá mañana, el día décimo sexto?

El trigésimo primer día, el Adivino Ch'in pregunta: ¿Va a recibir la región oriental una buena cosecha? El trigésimo primer día, el Adivino Ch'in pregunta: ¿No va a recibir la región oriental una buena cosecha?

El vigésimo séptimo día, el Adivino Pin pregunta: ¿Debería conducir el rey una campaña militar esta primavera contra los bárbaros Yi? El vigésimo séptimo día, el Adivino Pin pregunta: ¿Debería no conducir el rey una campaña militar esta primavera contra los bárbaros Yi?

El trigésimo noveno día, el Adivino Ku pregunta: ¿Tendrá buena salud la Señora Hao, después de que dé a luz un niño? El trigésimo noveno día, el Adivino Ku pregunta: ¿No tendrá buena salud la Señora Hao después de que dé a luz un niño?

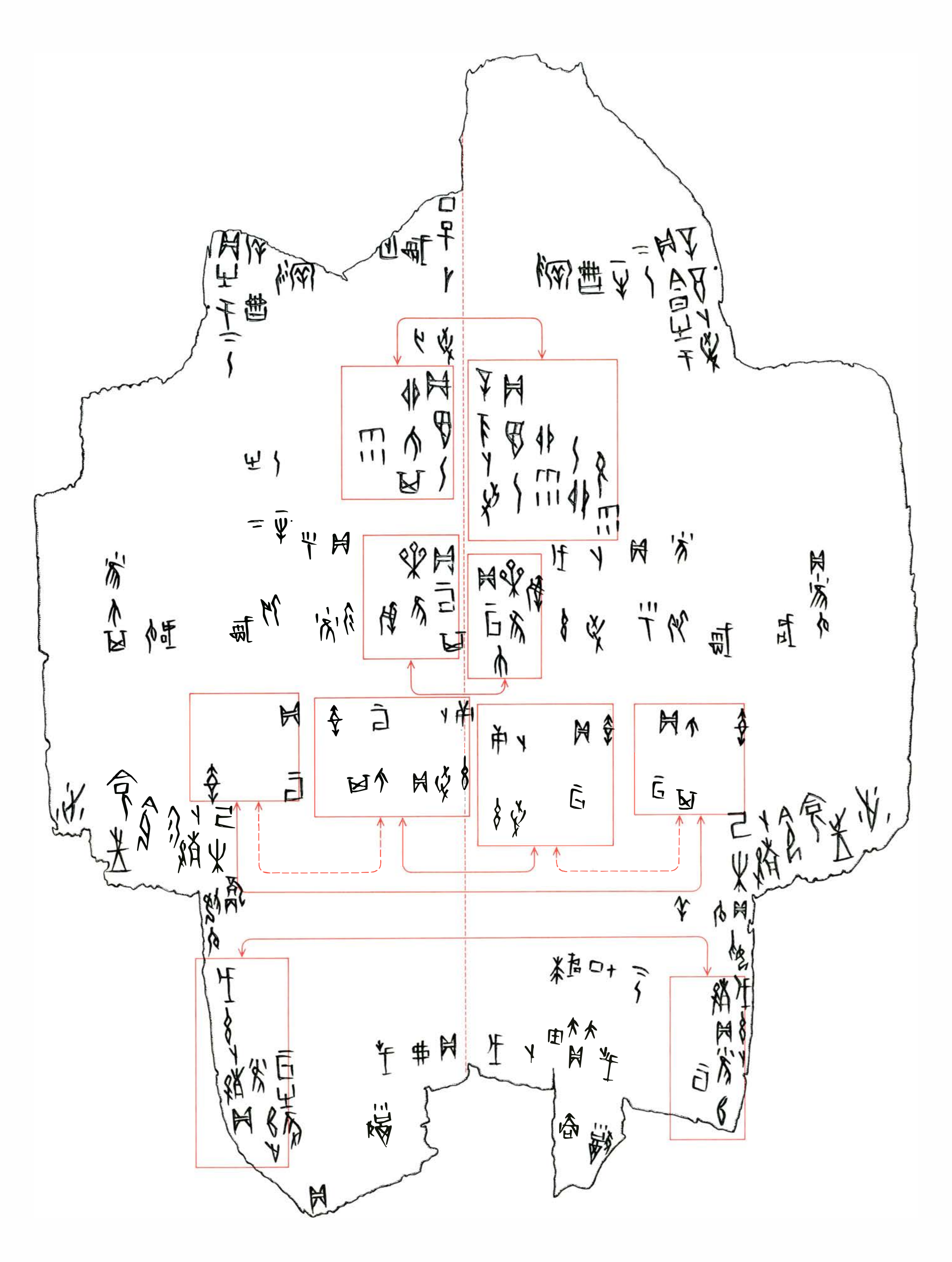
[No hay fecha ni nombre] pregunta: ¿Sufrirá el rey un dolor de muelas? [No hay fecha ni nombre] pregunta: ¿No sufrirá el rey un dolor de muelas?



GRIETAS AUGURALES que se asemejan al carácter de escritura "pu" son fácilmente visibles en este fragmento de concha de tortuga, ya que estas resquebrajaduras fueron recalcadas tras el presagio. Cuando la grieta horizontal era perpendicular a la vertical o dentro de los 20 grados de la perpendicular, la respuesta oracular era considerada favorable por el adivino; fuera de este campo, la respuesta era desfavorable. El grabado de la parte inferior es el carácter "pu" en tipo impreso chino moderno.

En ocasiones, el resultado de un acontecimiento presagiado se registra también en el hueso mántico, como en el ejemplo siguiente: El quincuagésimo quinto día, el adivino Ku interroga: ¿Obtendremos [algo] cuando cacemos en Kuei? Asiento: En dicho día cazamos y dimos muerte a un tigre, cuarenta gamos, ciento sesenta y cuatro lobos y ciento cincuenta y nueve corzos. Matamos también a una pareja de zorras.

Algunos sinólogos ven en la práctica Shang de plantear preguntas en pares



VARIOS GRUPOS DE PREGUNTAS inscritos sobre esta concha de tortuga, exhumada de una excavación de Anyang. Los adivinos que las inscribieron, Cheng y Ku, redactaron sus interrogantes en la moda antitética sobre cada lado de la línea central del caparazón. Los cuadrados y las flechas continuas identifican cinco pares; las discontinuas muestran que 4 de las cuestiones abarcan dos conjuntos de dos cuestiones cada uno.

antitéticos una prefiguración del concepto del yin-yang que desempeña un papel importante en la filosofía china. Si esta interpretación es válida, podemos concederles a los Shang el mérito de haber fomentado aún otra tradición china que continúa siendo hoy objeto de veneración. Un lugar principal, entre estas tradiciones, lo ocupa el culto a los antepasados, observado, si no iniciado, por la aristocracia Shang.

Ya he mencionado que los adivinos dirigían normalmente sus interrogantes a los antepasados, esto es, a los antepasados de aquellos en cuyo nombre se solicitaba el consejo. Más del 95 por ciento de los huesos mánticos analizados hasta el momento fueron empleados para este tipo de preguntas. De esta gran mayoría, casi todos aparecían dirigidos a uno u otro antepasado masculino o femenino de una lista de unos setenta nombres diferentes. Complejos sistemas ceremoniales fueron desarrollados únicamente para el culto de estos setenta ascendientes y un buen número de inscripciones recogen dichas ceremonias. Ello sugiere que los miembros de la aristocracia del período Shang tenían inclinaciones religiosas y favorecían a los antecesores inmortales propios sobre todos los demás espíritus.

No obstante, los Shang no fueron exclusivamente adoradores de los antepasados. Algunas preguntas aparecían dirigidas a la sombría potencia Shang-ti (literalmente "Emperador Celeste" o "Dios"). Otras se dirigían a deidades menores como los númenes locales de ríos y montañas, del sol, del viento y de las nubes, e incluso, ocasionalmente, se dirigían a insectos. En este panteón múltiple puede verse delineada otra actitud tradicional china: la tolerancia respecto a la diversidad religiosa.

Hay una pequeña parte de huesos mánticos que no jugó papel alguno en la adivinación. Las inscripciones que portan son de dos clases: notaciones de calendario y registros del pago de tributos. Por razones desconocidas, las notaciones de calendario se realizaban exclusivamente sobre escápulas de buey. Los registros tributarios aparecen tanto sobre hueso como sobre concha de tortuga; de una forma característica, estos textos se grababan dentro de la cavidad de la fosa escapular, sobre los cabos de la concha de tortuga o sobre sus dos láminas de la "cola".

El calendario Shang era el lunar, articulado sobre un ciclo recurrente de sesenta días: seis semanas, cada una con una duración de diez días. El ciclo de sesenta es el resultado de combinar dos series antiguas de símbolos: los diez "tallos celestes" ("t'ien-kan") y las doce "ramas terrestres" ("ti-chih"). Esta construcción cosmológica puede haber provenido del antiguo zodíaco babilonio. El ciclo de sesenta pervive en China en la actualidad, aunque su aplicación principal reside en el cómputo de un ciclo de sesenta años antes que sesenta días. En cualquier caso, debido a su fundamento lunar, el calendario Shang exigía un reajuste a intervalos regulares, normalmente, la adición de un mes bisiesto (conocido como el décimo tercer mes en las inscripciones osteománticas) cada tres años.

Respecto a los registros tributarios, los dirigentes Shang parecen haber sido los señores de una sociedad feudal (aunque esta conclusión sigue siendo objeto de polémica). Al menos, las inscripciones recogen pagos de tributos a la corte real y los documentos incluyen numerosos topónimos, que pueden ser interpretados como los hogares de los vasallos que ofrecían el tributo. Una detenida investigación por parte de varios estudiosos ha sugerido la ubicación geográfica de estos y otros topónimos mencionados en las inscripciones osteománticas. Aunque las conclusiones son experimentales, el dominio político Shang puede haber sido superior en extensión a lo que se había supuesto. Recientes hallazgos arqueológicos vienen a reforzar dicha conclusión. Mientras estaba visitando China el pasado verano, fui informado de que acababa de exhumarse un yacimiento Shang cerca de la costa oriental de la provincia de Kwangtung, unos 250 kilómetros al este de Hong Kong. Este lugar se encuentra a unos 1200 kilómetros al sur de Anyang, la última capital Shang, y supone el yacimiento Shang más meridional con mucho descubierto.

Las inscripciones sin finalidad adivinatoria son, al menos por el momento, demasiado escasas como para tener más que un significado limitado para los estudiosos del período Shang. Para temas como el origen de las gentes Shang, la estructura de su gobierno, las relaciones entre la clase dominante y los campesinos y esclavos, la naturaleza de la economía y las variedades de su agricultura, y para cuestiones sociales como la naturaleza de los usos matrimoniales y la condición relativa de los sexos, los estudiosos de esta época de la aparición de la cultura china deben depender, casi por entero, de las cuestiones planteadas por los adivinos Shang.

Como muestra de lo que puede aprenderse, consideremos la condición de las mujeres y, en particular, lo que los estudiosos han reconstruido sobre la misma Señora Hao, en cuyo nombre el adivino Ku interrogó sobre un parto inminente. Los huesos mánticos sugieren que las mujeres de la aristocracia Shang gozaban de una condición relativamente elevada. Su suerte era, ciertamente, mejor que la de las mujeres de las clases superiores de la dinastía Chou, si podemos juzgar por inscripciones sobre vasijas de bronce, por escritos históricos y por pasajes en las obras clásicas de Confucio. Según estas fuentes, las mujeres Chou, en su gran mayoría, aparecían confinadas en sus habitaciones y estaban excluidas de tomar parte de las actividades públicas.

Esto no es lo que ocurre con la Señora Hao. En los numerosos agüeros llevados a cabo en su nombre, se plantean preguntas no sólo sobre partos, sino también sobre el éxito de sus prácticas religiosas e, incluso, sobre sus empresas militares. Algunas de sus inscripciones hacen referencia a ella como consorte real, otras como vasallo feudal y otras aún como comandante militar con el rango de general. Sobre un fragmento de espaldar de tortuga, en la actualidad en el Gulbenkian Museum of Oriental Art and Archaeology de Inglaterra, se recoge que la Señora Hao mandaba una de las dos columnas enviadas para batir a un enemigo regional. Su colega en el mando, un varón, conducía una fuerza de 10.000 hombres. La hueste de la Señora Hao era de 3000. Y la Señora Hao no era en absoluto la única mujer Shang en disfrutar esta condición. Los huesos mánticos mencionan más de otras cien mujeres por sus nombres; muchas de ellas tomaron parte activa en funciones religiosas, políticas y militares.

En 1975, por una feliz coincidencia, los arqueólogos que trabajaban en el área de Anyang localizaron y excavaron la tumba de la Señora Hao. El descubrimiento, que todavía no ha sido comunicado formalmente, confirmó con creces la elevada condición de esta aristócrata Shang implícita en las inscripciones osteománticas. Su sepulcro contenía, según las relaciones preliminares, 16 sacrificios humanos, más de 500 artículos de piedra y jade tallados, más de 400 huesos labrados, alijos de armas de bronce, instrumentos y espejos, numerosos instrumentos musicales y unas 200 vasijas de bronce, incluida una jofaina rectangular de dimensiones sin precedentes.

El ejemplo de la Señora Hao es sólo uno de los fascinantes vislumbres sobre las vidas y actividades de la gente de los Shang que las inscripciones osteománticas nos proporcionan, aun cuando estas vidas se hallen separadas de las nuestras por tres milenios.

Física del karate

El examen concienzudo de la forma en que un experto en karate puede romper bloques de madera y de hormigón con su simple mano pone de manifiesto la notable capacidad del cuerpo para ejercer sin ayuda una fuerza física

Michael S. Feld, Ronald E. McNair y Stephen R. Wilk

Nos es familiar la imagen de un experto en karate rompiendo gruesos bloques de madera o de hormigón valiéndose simplemente de su mano. La operación resulta tan rara que a menudo se considera como un engaño o una ilusión, pero en realidad no hay truco alguno. Incluso un principiante en el ejercicio del karate puede rápidamente aprender a romper una buena tabla de madera, y pronto llega a ser capaz de romper una pila entera de ellas. Estudiamos con detalle cómo la simple mano puede romper bloques de madera o de hormigón (y por extensión realizar daños análogos en otros objetos) sin sufrir fracturas o lesiones. El descubrimiento clave reside en que la mano del karateka, es decir, del que practica el karate, puede desarrollar una velocidad máxima de 10 a 14 metros por segundo y ejercer una fuerza superior a los 3000 newton, es decir, unos 300 kilogramos. Si la posición de la mano es la adecuada puede resistir fácilmente la fuerza contrapuesta resultante.

La práctica actual del estilo japonés de karate fue desarrollada en la isla de Okinawa. Los japoneses, al conquistarla en el siglo XVII, quitaron a los nativos todas sus armas y prohibieron tanto su fabricación como su importación: incluso se llegó a prohibir la fabricación de espadas destinadas a ritos y ceremonias. Para defenderse ellos mismos, los habitantes de Okinawa desarrollaron el karate, que constituye un sistema de combate basado en el empleo de la mano desnuda. Procede de los métodos de lucha sin armas de los antiguos monjes, guerreros y médicos de China. El karate es simplemente uno más de una amplia variedad de artes marciales desarrollada en Oriente, entre las que se cuentan el "tae kwon do", el "kempo" y el "kung fu".

Las técnicas del karate difieren netamente de las seguidas en los métodos occidentales de combate con mano desnuda. El karateka concentra sus golpes sobre una pequeña área del objetivo y trata de conseguir una penetración de cerca de un centímetro, sin la acción extensa y continuada del puñetazo en el boxeo occidental. Mientras los boxeadores comunican un gran impulso a toda la masa de su oponente, echándolo hacia atrás, el karateka comunica un gran impulso a un área reducida del cuerpo de su oponente, y este ímpetu es capaz de romper los tejidos y los huesos. Un golpe de karate bien ejecutado suministra al objetivo varios kilowatt de potencia durante varios milisegundos, lo cual basta para romper bloques de madera y de hormigón.

En la actualidad se practica el karate como un deporte y como un método potencial de autodefensa. El karateka estudia diversas operaciones, cada una de las cuales puede ejecutar de una forma exactamente prescrita. La precisión que se le exige hace que el karate no sólo sea una excelente disciplina física, sino también un buen ejercicio mental. Aunque el romper objetos no constituya su finalidad, discutiremos dicha operación como un medio para poner de relieve la cantidad de energía suministrada en un golpe de karate bien ejecutado. Parece que su práctica desarrolla al máximo la capacidad del hombre para ejercer sin ayuda una fuerza física.

Los bloques de madera que empleamos en nuestros experimentos eran piezas normalizadas de pino blanco seco que pesaban 280 gramos, medían 28 centímetros de largo, 15 centímetros de ancho y 1,9 centímetros de grueso. Estaban cortadas de modo que el veteado fuera paralelo al ancho. Las tabletas de hormigón eran ladrillos que pesaban 6,5 kilogramos y tenían 40 centímetros de largo, 19 de ancho y cuatro de grueso. Tales ladrillos fueron secados en un horno durante varias horas para eliminar el exceso de agua y con ello hacer su contenido uniforme. Hacia los extremos de cada bloque de madera o de hormigón, se colocó un soporte que reducía su longitud efectiva en cuatro centímetros.

En una demostración de rotura de bloques, el karateka golpea encima del bloque en un conjunto de puntos próximos al centro. En nuestros experimentos, por razones de sencillez, supondremos que la fuerza está uniformemente distribuida en todos estos puntos. Además supondremos, y experimentos posteriores lo confirman, que la flexión del bloque al ser golpeado es muy pequeña al lado de sus dimensiones.

Como primera etapa en la comprensión de la física del proceso de rotura, imaginemos un puño levantado contra un bloque apoyado en sus extremos. El impacto motivará que el bloque se flexione en la dirección según la cual se mueve el puño. Al deformarse el bloque, la mitad superior resulta comprimida mientras la mitad inferior se expansiona. La máxima compresión se presenta en la superficie superior y la máxima expansión en la superficie de la base. Debido a que la madera y el hormigón son menos resistentes a una tensión que a una compresión, el bloque empieza a rajarse en la superficie del fondo. La grieta se propaga rápidamente hacia arriba a medida que el puño sigue ejerciendo sobre el bloque una fuerza hacia abajo.

La elongación en la superficie del fondo es ocasionada por la fuerza en el plano del bloque que resulta del impacto del puño. Expresado de otro modo, el esfuerzo en este plano, o fuerza referida a la unidad de sección recta, da lugar a una deformación o elongación relativa del bloque. La relación entre esfuerzo y deformación se comprende mejor imaginando que el fondo del bloque está formado por un muelle helicoidal horizontal. El bloque resiste al esfuerzo estirándose tal como lo hace el muelle. El muelle se opone con una fuerza que es proporcional a su extensión. En otras

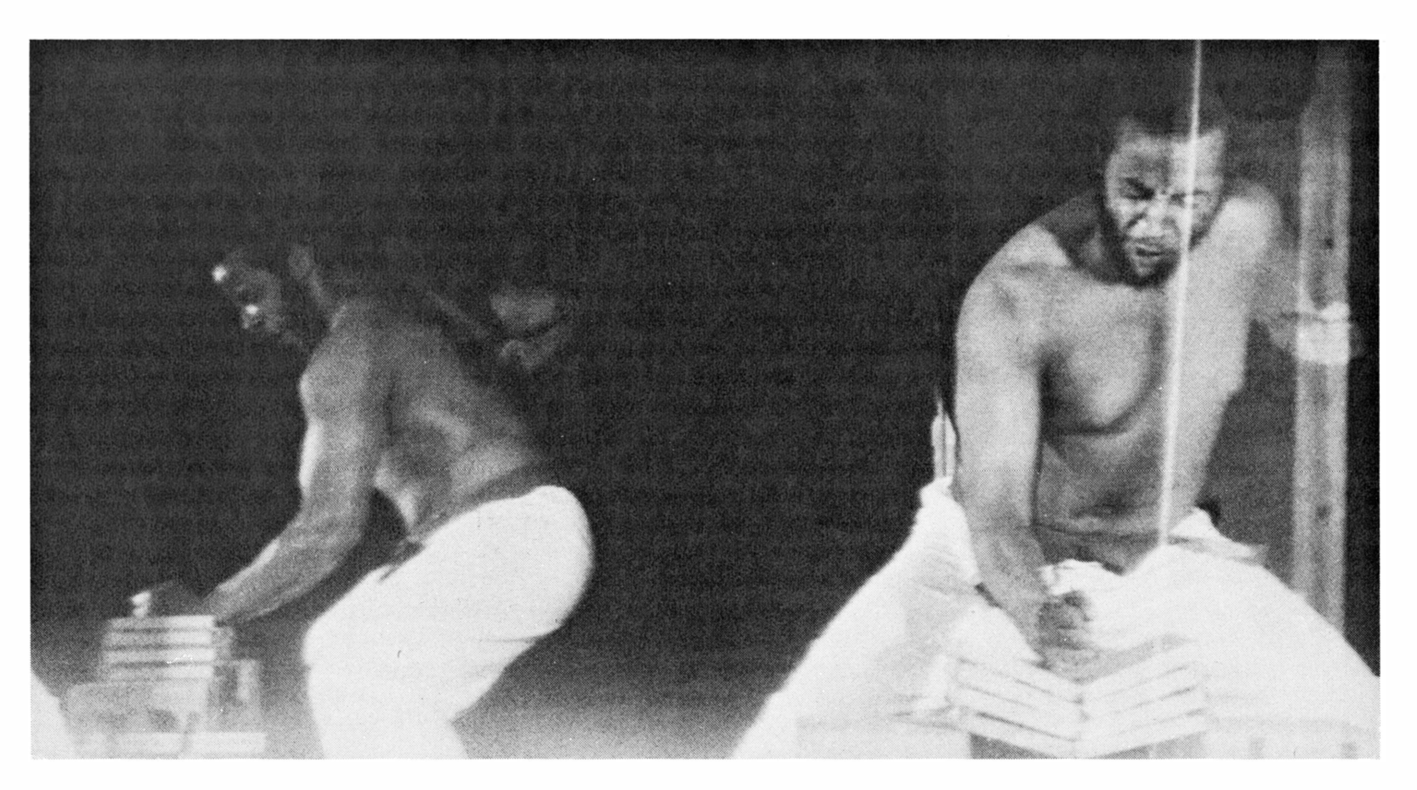


TRES BLOQUES DE HORMIGON rotos por uno de los autores (McNair) con la región palmar anterior de su mano derecha. Las muestras eran ladrillos que pesaban 6,5 kilogramos y medían 40 centímetros de largo, 19 de ancho y cuatro de grueso. Los soportes colocados cerca de los extremos reducían su longitud eficaz en 4 cm. Los huesos resisten un esfuerzo (fuerza por unidad de área) 40 veces mayor que el hormigón.

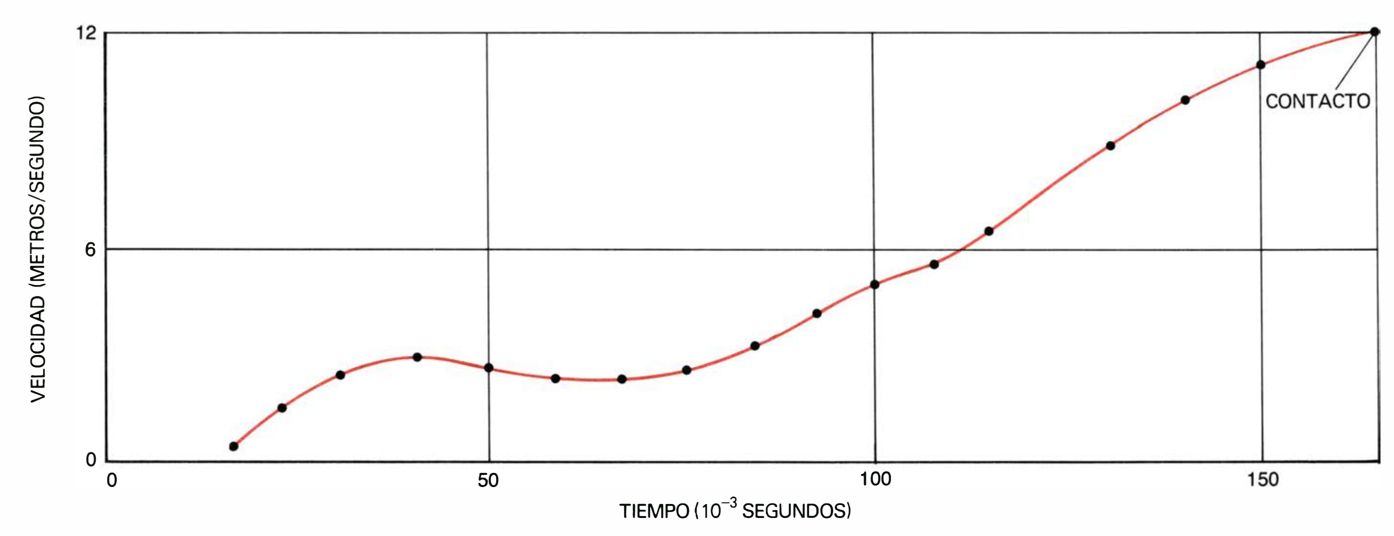
palabras, el esfuerzo es igual a la extensión multiplicado por la constante del muelle, que para un muelle dado es un parámetro que caracteriza su elasticidad. Ya que esfuerzo es análogo a fuerza, y deformación es análoga a extensión, vale una relación similar para el bloque: el esfuerzo es igual a la deformación multiplicado por el módulo de elasticidad, que para un material dado es una constante que depende de las características físicas del material. Cuando el esfuerzo alcanza un valor crítico, llamado módulo de rotura, el bloque se rompe.

Ya que el proceso de estirar un muelle hasta que se rompe es análogo a la rotura de un bloque, las ecuaciones para el muelle que conducen a las expresiones de la energía y la fuerza en el punto de rotura también son aplicables al bloque. Resulta que la energía necesaria para romper el bloque es igual a su volumen (V), multiplicado por el cuadrado del módulo de rotura (σ), dividido por el doble del módulo de elasticidad de Young (E). La fórmula $V\sigma^2/(2E)$ está de acuerdo con la intuición relativa al proceso de rotura. Es evidente que se necesita más energía para romper bloques grandes y bloques que están sujetos a mayores esfuerzos. No sorprende tampoco que la energía crítica sea inversamente proporcional al módulo de elasticidad. Este es una medida de la elasticidad del bloque y cuanto mayor es dicho módulo es más baja la energía crítica, pues se necesita menos energía para deformarle.

La fórmula anterior proporciona sólo una estima aproximada de la energía crítica; las propiedades físicas de los bloques no son tan simples como las de los muelles. Sin embargo, es útil ya que indica los parámetros que son importan-



CAMARA GIRATORIA que proporciona vistas simultáneas laterales y de frente de un martillazo de puño. Este describe un arco circular desde encima de la cabeza hacia abajo. El puño está rompiendo cuatro bloques de madera seca de pino blanco. Cada bloque pesa 280 gramos y mide ventiocho centímetros de largo, quince de ancho y 1,9 de grueso. Los bloques fueron cortados de manera que el veteado fuera paralelo a la anchura.



VELOCIDAD DEL PUÑO en el martillazo, que se determinó mediante el análisis de una secuencia de fotografías tomadas con la cámara giratoria. Una de las cuales corresponde a la fotografía superior. El puño alcanzó una velocidad máxima de 10 metros por segundo en el punto de impacto. Otras secuencias llegaron a revelar velocidades máximas de 14 m por segundo. Este golpe constituye uno de los movimientos de karate más potentes.

tes en el proceso de rotura y da idea de su influencia relativa. Así, la fórmula sugiere que la energía crítica es proporcional al cuadrado del módulo de rotura, lo cual señala que si se tienen dos materiales con las mismas propiedades salvo que sus módulos de rotura difieren en un factor dos, se necesita una energía cuatro veces mayor para romper el material de módulo mayor.

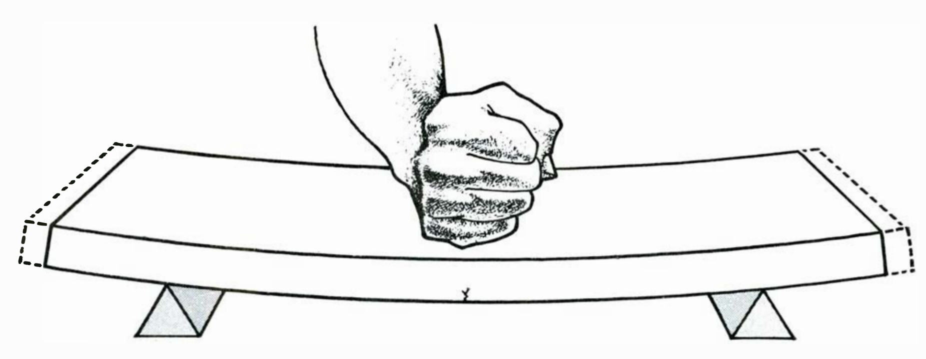
Para calcular las energías críticas aplicando la fórmula, hay que conocer los módulos de rotura y de elasticidad de los dos tipos de bloque empleados. Debido a que no figuran los datos pertinentes en la bibliografía hemos medido dichos módulos en una prensa hidráulica en la que se colocaron las muestras de madera y de hormigón y se registró la deformación en función de la fuerza aplicada. La madera es un material bastante elástico; normalmente muestra un centímetro de deformación antes de que se produzca la rotura. Es necesaria una fuerza de 500 newton para provocar dicha deformación. (Un newton es aproximadamente equivalente a la fuerza ejercida por el peso de 100 gramos, o sea, el de una manzana.) La deformación requerida para provocar la rotura en un bloque de hormigón es sólo de un milímetro y para ello se necesita una fuerza comprendida entre 2500 y 3000 newton. A partir de estas mediciones, se encuentra que el módulo de elasticidad de la madera vale $1{,}4 \times 10^8$ newton por metro cuadrado y el del hormigón es de $2{,}8 \times 10^9$. El módulo de rotura de la madera importa $3{,}6 \times 10^6$ newton por metro cuadrado y el del hormigón $4{,}5 \times 10^6$.

Al introducir los valores de tales módulos en la fórmula de la energía resulta una energía crítica de 32 joule para la madera y de 10 joule para el hormigón. (Un joule es la energía necesaria para elevar una pesa de un kilogramo diez centímetros de altura.) Tales estimas aproximadas de las energías críticas parecen ser del orden de magnitud correcto, pues las mediciones indican que se dispone de unos 100 joule mediante un golpe de karate. Tales valores de la energía crítica no son dignos de confianza considerados individualmente, pero en conjunto dan una idea adecuada de la razón entre la energía requerida para romper la madera y la energía necesaria para romper el hormigón. Tales valores sugieren que el puño debe entregar una energía unas tres veces superior a la madera que al hormigón.

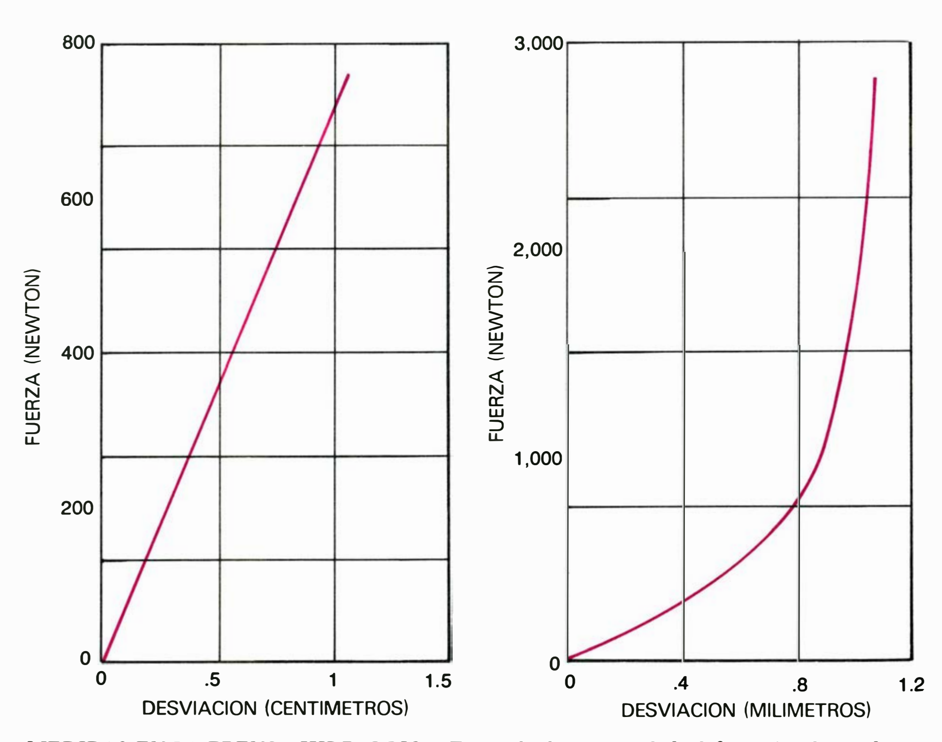
Realizamos unas estimas más precisas de la energía crítica considerando las

OPERACION	VELOCIDAD MAXIMA (METROS/SEGUNDO)
PUÑETAZO FRONTAL	5.7 – 9.8
MARTILLAZO DE PUÑO	10 – 14
GOLPE DE CORTE	10 – 14
PATADA EN REDONDO	9.5 – 11
PATADA EN RUEDA	7.3 – 10
PUNTAPIE FRONTAL	9.9 – 14.4
PATADA LATERAL	9.9 – 14.4

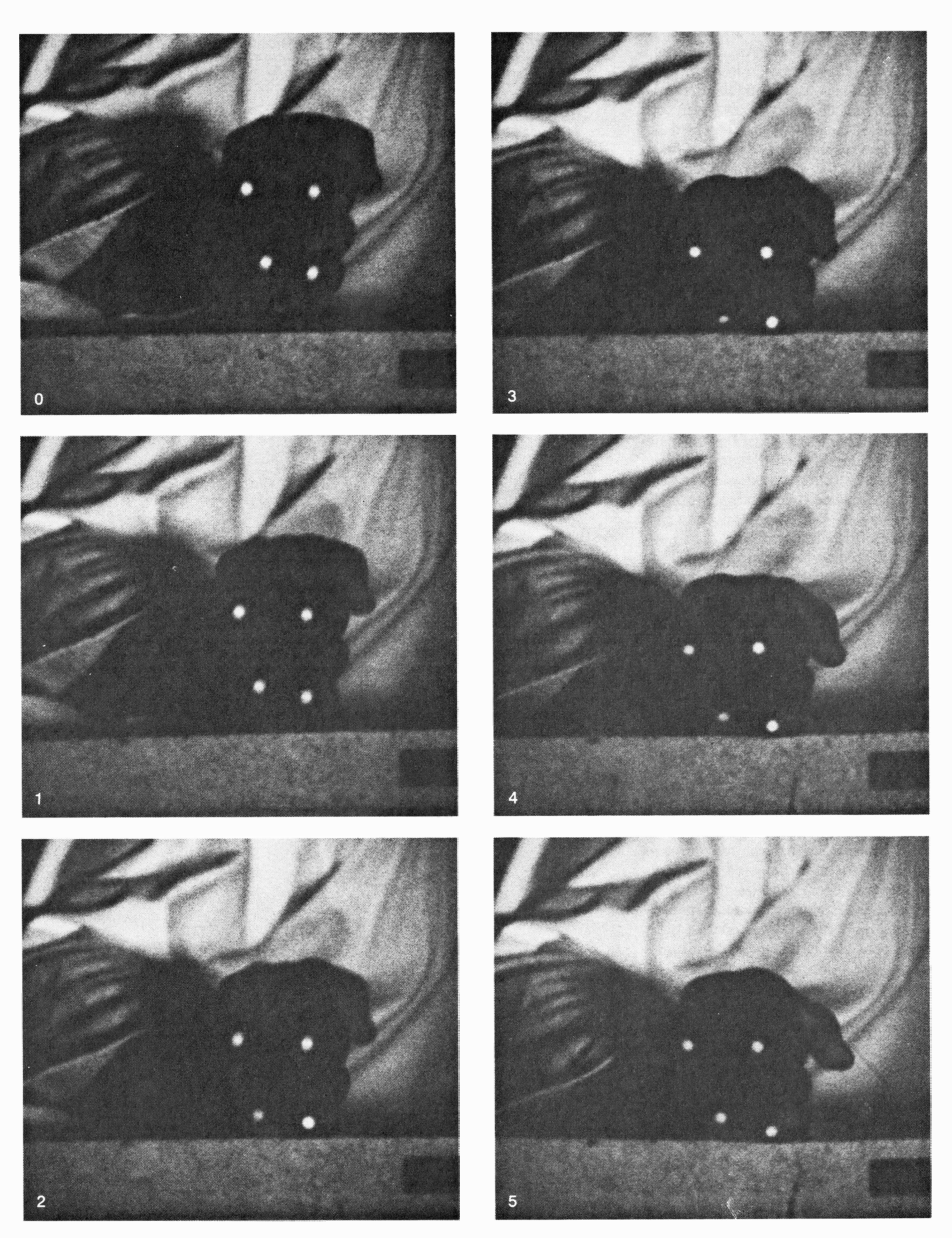
VELOCIDADES MAXIMAS DE LOS MOVIMIENTOS de karate, primero para los golpes con la mano desnuda y después para las patadas. El golpe de cuchillo con la mano es el llamado "corte de karate". En la patada en redondo el pie describe una circunferencia en el sentido de las agujas del reloj, mientras la mano opuesta se mueve en sentido contrario para mantener el cuerpo equilibrado haciendo mínima la variación de momento. En la patada en rueda el cuerpo gira con la pierna extendida.



MARTILLAZO DE PUÑO rompiendo un bloque de madera. Diagrama muy esquemático. En un golpe bien ejecutado, el puño incide en puntos cercanos al centro. El bloque actúa como un muelle de resorte: rechaza a la mano con una fuerza proporcional a la deformación experimentada. La cara superior del bloque resulta comprimida y la base extendida. Debido a que la madera resiste menos a las tensiones que a las compresiones, el bloque empieza a romperse por su base en puntos próximos a su centro. La rotura progresa hacia arriba a medida que el bloque sufre una fuerza opresora hacia abajo.



MEDIDAS EN LA PRENSA HIDRAULICA. Fueron hechas acerca de la deformación de un bloque de madera (*izquierda*) y de un bloque de hormigón (*derecha*) en función de la fuerza aplicada. Cada uno de los gráficos ofrece valores del módulo de elasticidad de Young, que es una constante típica del material, y del módulo de rotura, que es el esfuerzo mínimo capaz de romper el bloque. El conocimiento de tales módulos resulta útil a la hora de encontrar la energía que se necesita para romperlos.



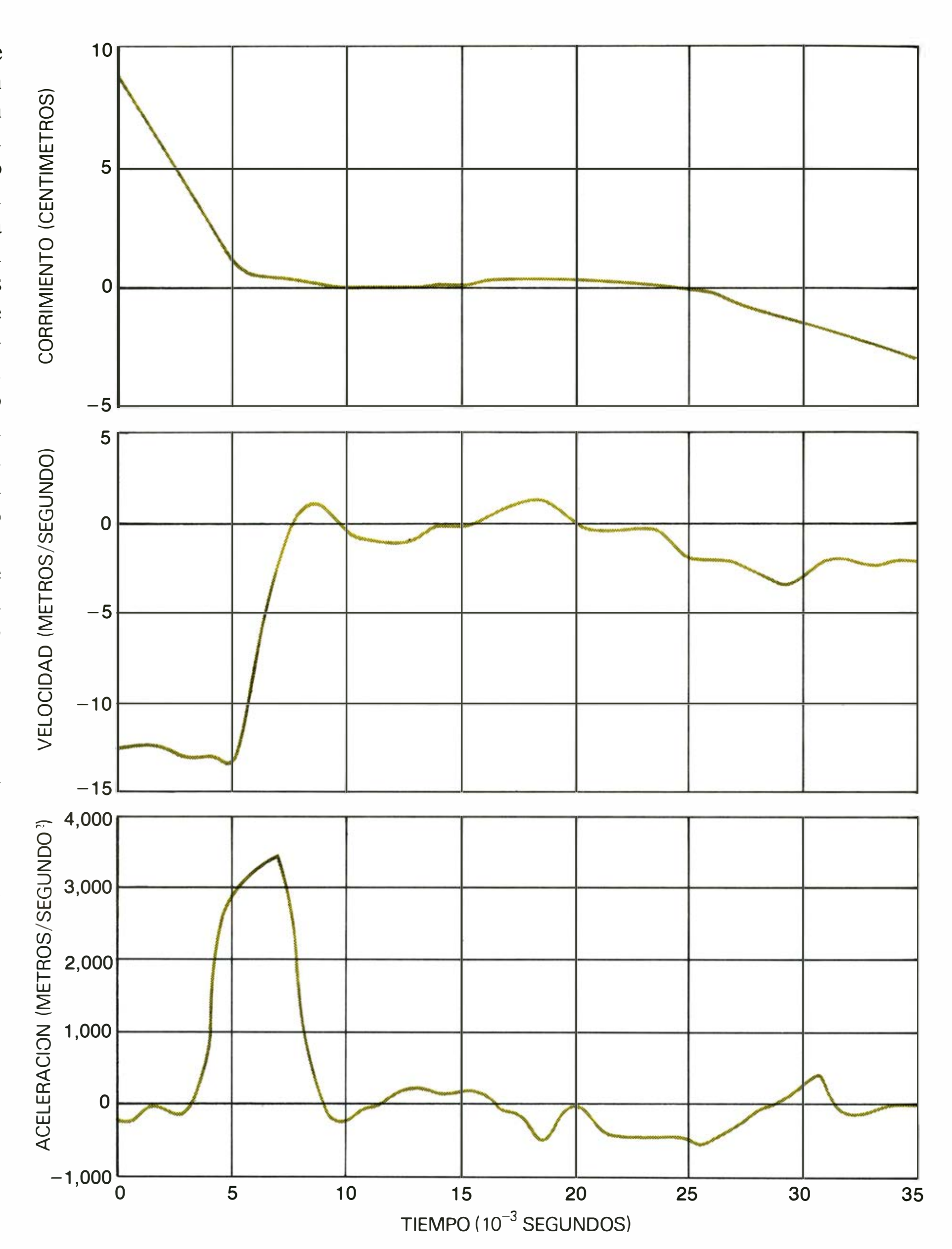
CUATRO PUNTOS DE REFERENCIA, que se colocaron a modo de señal en el lado de un puño. Permitieron medir, a partir de las fotografías, el corrimiento, la velocidad y la aceleración de las diferentes partes del puño. La toma de las fotografías estaba espaciada por intervalos de un milisegundo. Aunque el contacto del puño con el bloque se dio en *O*, la rotura no se desarrolló hasta *4*. El puño y el bloque estuvieron en contacto durante cinco milisegundos. En cuanto el puño golpea el bloque, se desacelera rápidamente. El cambio de las posiciones relativas de las señales indica que el puño se comprime y distorsiona en tal extensión que no puede ser considerado como un cuerpo rígido. Los modelos deben evitar verlo como tal.

propiedades acústicas de los bloques de madera y de hormigón. Cuando un objeto es golpeado, vibra, se propagan ondas a través del material y se emiten ondas sonoras hacia el aire. Lo mismo ocurre cuando el karateka golpea un bloque: se producen vibraciones que a veces deforman el bloque hasta llegar al punto de rotura. Las propiedades de tales vibraciones pueden predecirse basándose en una ecuación complicada que describe las ondas sonoras. La ecuación expresa una función tanto del tiempo como de la posición a lo largo del bloque, de modo que la vibración del bloque depende de la forma que adopta en cuanto la mano del karateka lo golpea.

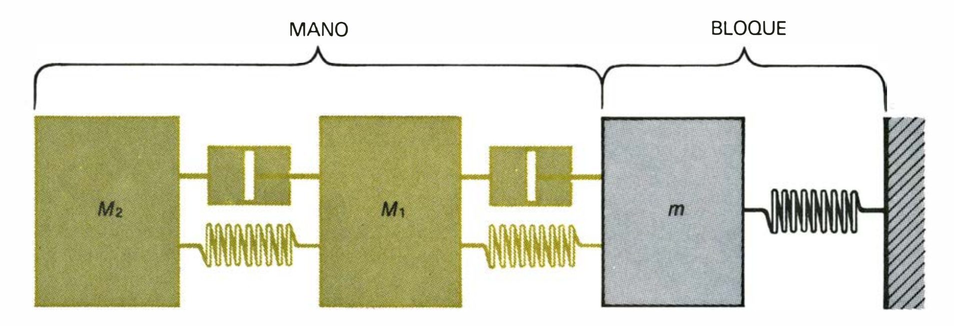
A este respecto el bloque es semejante a una cuerda de violín. Cuando la cuerda es pulsada suavemente, se excita tan sólo el tono fundamental y el movimiento resultante es sencillo; pero si la pulsación es más vigorosa, se excitan sobretonos y el movimiento resultante es más complicado. En un golpe de karate se excita solamente la vibración fundamental, debido a que la mano y el objeto interaccionan durante varios milisegundos. Este tiempo de interacción es comparable con el período de la vibración fundamental, pero es mucho mayor que los períodos de los sobretonos. Como consecuencia, los tonos superiores no son excitados; en efecto, no hay suficiente contenido armónico para excitarlos.

Debido a que sólo se emite el sonido fundamental, la ecuación que gobierna el movimiento del bloque queda considerablemente simplificada. El bloque actúa como si fuese una masa que pesara la mitad de lo que realmente pesa, apoyada sobre un muelle helicoidal. El modelo acústico proporciona una fórmula que da la energía crítica del bloque. Dicha fórmula indica que las primeras estimas de carácter aproximado eran unas seis veces demasiado altas. En otras palabras, se necesitan sólo 5,3 joule para romper la madera y 1,6 joule para romper el hormigón.

El modelo acústico también proporciona fórmulas para la fuerza crítica necesaria para romper el bloque y para los períodos de las ondas acústicas generadas por el golpe de karate. Hemos verificado los períodos pronosticados para bloques golpeados ligeramente con una goma de borrar lápiz observando las ondas sonoras resultantes con un micrófono unido a un osciloscopio. Las imágenes de las ondas sonoras recogidas en el osciloscopio mostraban períodos que están en buen acuerdo con los



CORRIMIENTO VERTICAL, velocidad y aceleración. Han sido representados para la señal inferior derecha del puño de las fotografías de la página anterior. La desaceleración máxima de la señal fue de 3500 metros por segundo al cuadrado; las de las demás, 4000 metros por segundo al cuadrado.



PROCESO DE IMPACTO. Está representado según un modelo dinámico que considera la mano y la región inferior del antebrazo como formados por dos masas, la primera de las cuales (M_1) corresponde al tejido superficial de la mano y la segunda (M_2) al resto de la mano y a la región inferior del antebrazo. Las masas están unidas mediante muelles y amortiguadores. Al establecer el modelo del golpe de karate, la mano representada por las masas acopladas incide en el bloque, representado por una masa (m) colocada encima de un muelle. Al resolver las ecuaciones acopladas que regulan la interacción, se encontró que la mano necesita una energía de 12,3 joule para romper la madera y de 37,1 joule para partir el hormigón. El modelo dinámico constituye una ligera modificación del desarrollado por John Mishoe y Charles Suggs, de la Universidad de Carolina del Norte, para estudiar la respuesta de la mano y del antebrazo a las vibraciones producidas por la maquinaria industrial.

valores predichos. Esto confirma la validez del modelo acústico.

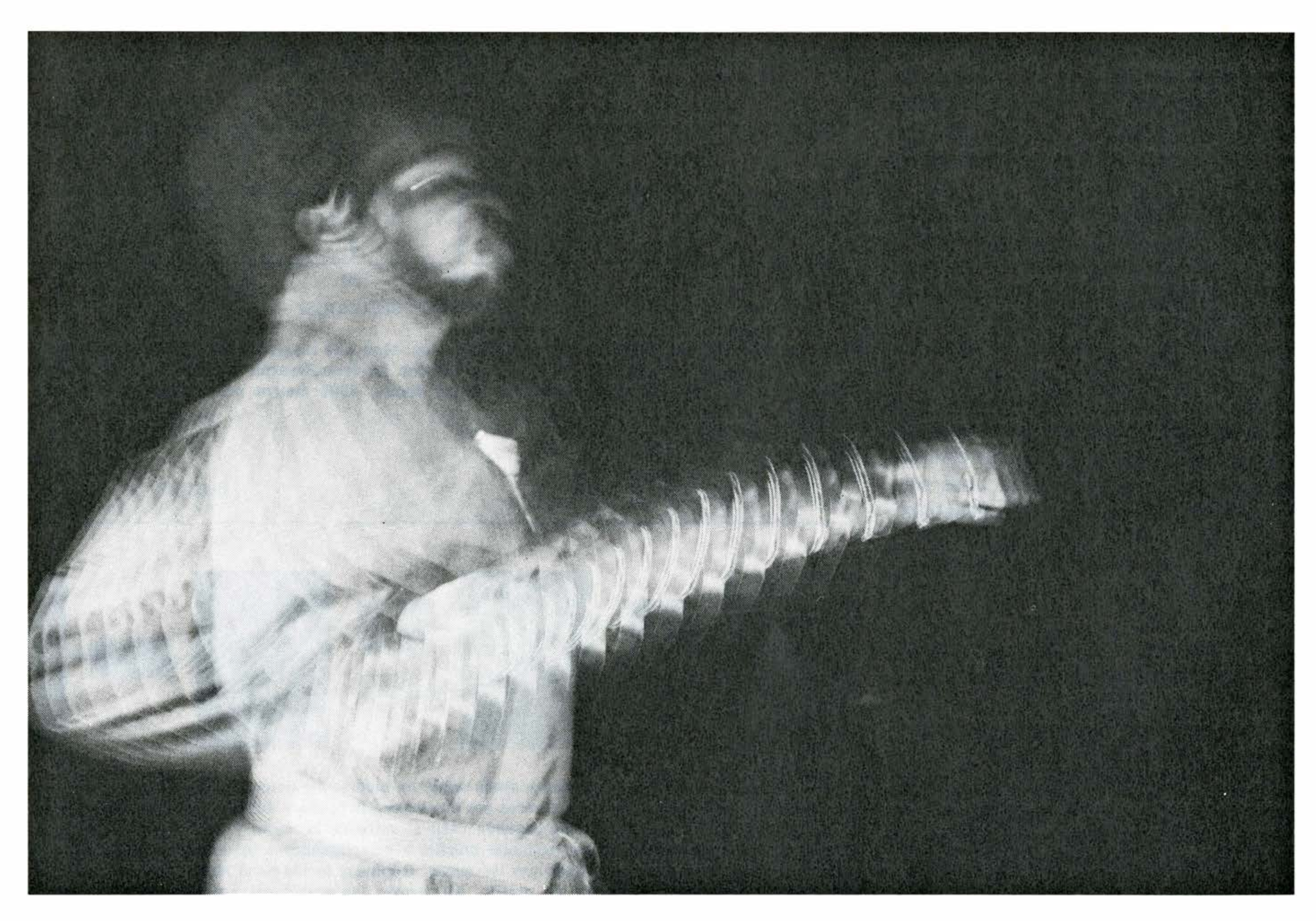
La fórmula para la fuerza crítica da un valor de 670 newton para la madera y de 3100 para el hormigón. Es decir, se necesita una fuerza cinco veces mayor para romper el hormigón que para romper la madera y en cambio sólo un tercio de la energía. La energía es el producto de la fuerza por la deformación; por tanto, el que la madera se deforme 16 veces más que el hormigón es la causa de que tenga una mayor energía crítica.

A primera vista este resultado parece contradictorio, pues la mayor energía crítica de la madera sugiere que el hormigón es más fácil de romper que la madera. Naturalmente, la experiencia indica lo contrario. La contradicción se resuelve teniendo en cuenta que no toda la energía del golpe de karate va a parar al objeto. Las energías críticas calculadas por nosotros no representan la energía de la mano del karateka sino la que debe ser trasferida al objeto para romperlo. La energía que necesita la mano depende de la facilidad con la que la energía es transmitida desde la mano al objeto, la cual a su vez es función de la relación de masas entre la mano y el objeto. Si el objeto es más ligero que la mano, como ocurre con la madera, acepta casi toda la energía. Cuando el objeto es más pesado, como en el caso del hormigón, acepta sólo una pequeña fracción de la energía. Esto explica por qué la madera es más fácil de romper.

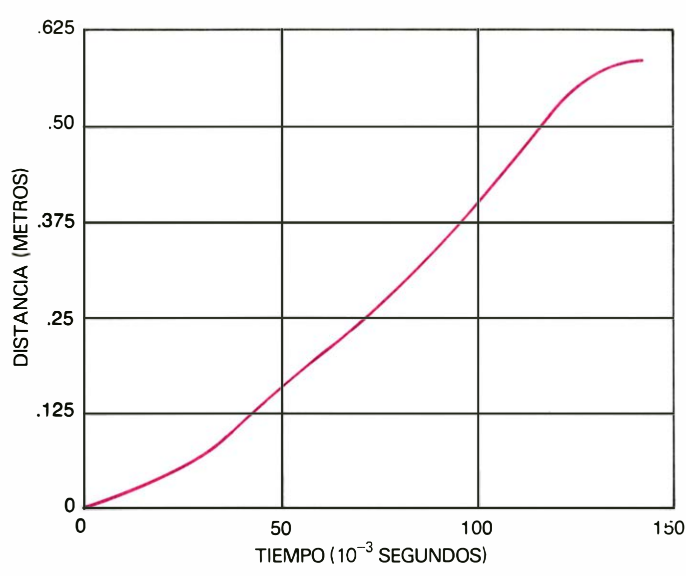
El papel que tiene la masa en la transferencia de la energía puede aclararse considerando pelotas de goma. Imaginemos una pelota de goma lanzada al aire. Si choca con otra idéntica que está en reposo, la primera se detiene y la segunda absorbe su energía y continúa siguiendo la trayectoria que tenía la primera bola. Si, por el contrario, la pelota choca con otra más pesada la primera rebota con casi la misma velocidad que llevaba, mientras la segunda apenas se mueve. Estos dos casos son ejemplos de una colisión elástica; en ella, la energía cinética, o energía de movimiento, se conserva. Es decir, la energía cinética que tenía la primera pelota antes del choque es igual a la suma de las energías cinéticas de ambas pelotas después del choque.

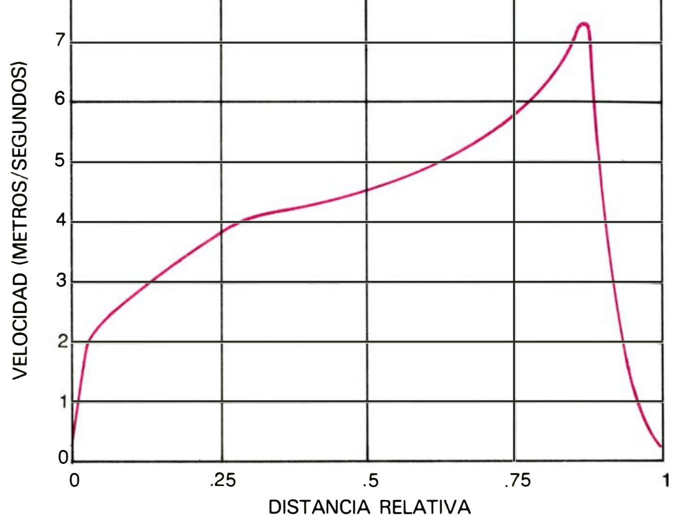
Un golpe de karate no es una colisión elástica. Hemos tomado imágenes de movimiento de alta velocidad que demuestran que la mano y el objeto permanecen en contacto durante todo el proceso de rotura. En el impacto, la mano y el objeto se mueven juntos. En tal colisión inelástica no toda la energía cinética de la mano pasa a ser energía cinética del sistema combinado. Parte de ella se emplea inevitablemente en la deformación: el aplastamiento de la mano y del objeto uno contra otro. Cuanto más pesado es el objeto menos energía cinética se emplea en movimiento y más se convierte en deformación. Con la madera la mayor parte de la energía cinética se conserva, pero en el hormigón una parte sustancial se emplea en deformar la mano.

Se puede realizar una estima simple de la energía transferida en un golpe de karate, suponiendo que la colisión entre la mano y el bloque es completamente inelástica. Partiendo de las leyes cinemáticas que describen el movimiento de los cuerpos que chocan inelásticamente, y teniendo en cuenta las energías críticas que hemos calculado, resulta fácil determinar los valores de la energía que necesitaría una mano para romper los



FOTOGRAFIA ESTROBOSCOPICA de un puñetazo de karate; en el proceso de la misma, el experto fue iluminado con 120 destellos por segundo. Indica que el puño alcanza su máxima velocidad un poco antes de que el brazo quede bien extendido. El karateka dirige su puñetazo justo dentro del objeto, de suerte que el puño alcance su máxima velocidad en el punto de contacto. Y así, el puñetazo proporciona un gran impulso al objeto.





VELOCIDAD MAXIMA, unos 7,5 metros por segundo, alcanzada por el puño mostrado en la fotografía de la página anterior. Teniendo en cuenta la distancia entre posiciones sucesivas (*izquierda*), se ha representado la velocidad del puño en función de la fracción recorrida de la distancia total.

bloques: son 6,4 joule para la madera y 8,9 para el hormigón. El modelo de colisión inelástica confirma lo evidente: la madera se rompe con mayor facilidad.

Vamos a dejar de lado el modelo teórico y vamos a ver la energía, la velocidad y la aceleración que en la realidad intervienen en los golpes de karate. Hemos determinado tales cantidades a partir de fotografías estroboscópicas realizadas con destellos múltiples tomadas con el obturador de la cámara abierto, mientras el karateka realizaba el movimiento. El karateka fue iluminado con 120 destellos por segundo, de modo que quedó registrada en la fotografía la posición que tenía al producirse cada destello. Midiendo las distancias entre posiciones sucesivas pudo calcularse fácilmente la velocidad y la aceleración de la mano del karateka. Las fotografías estereoscópicas revelaron velocidades máximas de 10 a 14 metros por segundo en el martillazo de puño (en él, el puño cae desde más arriba de la cabeza siguiendo un arco circular) y en el golpe de cuchillada con la mano (el "corte de karate"). En el puñetazo de karate hacia delante, la mano alcanza velocidades comprendidas entre 5,7 y 9,8 metros por segundo y en varias patadas las velocidades alcanzadas por el pie oscilan entre 7,3 y 14,4 metros por segundo. Las velocidades máximas en el martillazo de puño corresponden a energías entre 50 y 100 joule, que son bastante superiores a los 6,4 joule que la mano necesita para romper la madera y a los 8,9 joule precisos para romper el hormigón, tal como hemos calculado a partir del modelo de choque inelástico.

A pesar de este resultado, que es alentador, el modelo de colisión inelástica sólo nos aproxima de una manera burda al proceso de interacción entre la mano y el bloque. De una manera errónea, el modelo supone que el choque finaliza antes de que el bloque empiece a romperse. Nuestras imágenes de alta velocidad muestran que la mano y el bloque todavía interaccionan mientras el bloque se está quebrando. Otra simplificación del modelo reside en que no nos dice nada acerca de la dinámica del proceso de fractura o acerca de las fuerzas que actúan sobre la mano y en el antebrazo durante el golpe.

Las fotografías del movimiento fueron hechas tomando 1000 imágenes por segundo, lo que hace posible observar el proceso de impacto en movimiento lento y estudiar individualmente cada imagen para ver lo que sucede durante cada milisegundo. Una secuencia de imágenes registró un golpe de martillazo de puño al chocar contra un bloque de hormigón. Colocamos cuatro puntos como señal en el puño, de modo que se pudiese estudiar la velocidad y la aceleración de las diferentes partes del puño durante el choque. A medida que el puño golpeaba el bloque, se desaceleraba rápidamente. Alcanzaba una aceleración negativa máxima de 3500 metros por segundo al cuadrado en la parte inferior derecha del puño (cuando se golpeó con el punto derecho) y 4000 metros por segundo al cuadrado en el resto del puño. Se comprime y se distorsiona el puño de tal modo que difícilmente puede considerarse un objeto rígido. El impacto dura unos cinco milisegundos, y la tableta empieza a romperse por su base en cuanto se ha deformado el primer milímetro.

Los datos recogidos a partir de las imágenes del movimiento pueden ser empleados para estimar la fuerza máxima ejercida por el puño durante el impacto. La fuerza máxima es el producto de la masa del puño por su desaceleración. Para una masa de 0,7 kilogramos la fuerza está comprendida entre 2400 y 2800 newton, lo cual supone valores unas 400 veces mayores que la gravedad. Se tomaron imágenes semejantes con un martillazo de puño sobre un bloque de madera, pero la desaceleración es demasiado pequeña para que pueda medirse de un modo preciso.

Para una mejor descripción del proceso de impacto, consideremos el modelo dinámico que John M. Mishoe y Charles W. Suggs, de la Universidad estatal de Carolina del Norte, han desarrollado para estudiar la respuesta de la mano y del antebrazo a las vibraciones producidas por máquinas industriales. A diferencia de lo que ocurre en el modelo de la colisión inelástica, aquí la mano no se la supone un objeto rígido: se considera que la mano y la región inferior del antebrazo están formadas por tres masas (correspondientes a la piel de la mano, el tejido que está por debajo de la piel y el 90 por ciento restante de la masa de la mano y de la región inferior del antebrazo).

Las tres masas están unidas por muelles y amortiguadores. Para nuestros propósitos es necesario representar la mano sólo por dos de estas tres masas acopladas, pues la masa referente a la piel es despreciable.

Al establecer el modelo del golpe de karate, la mano, representada por las masas acopladas, cae sobre el bloque, indicado por una masa sobre un muelle, cuyos parámetros fueron determinados a partir del análisis acústico antes descrito.

Una vez resueltas mediante un ordenador las complicadas ecuaciones que regulan su interacción, se encontró que la mano necesita 12,3 joule de energía para romper la madera y 37,1 joule para romper el hormigón. Estos valores son algo superiores a los que predice el modelo de choque inelástico.

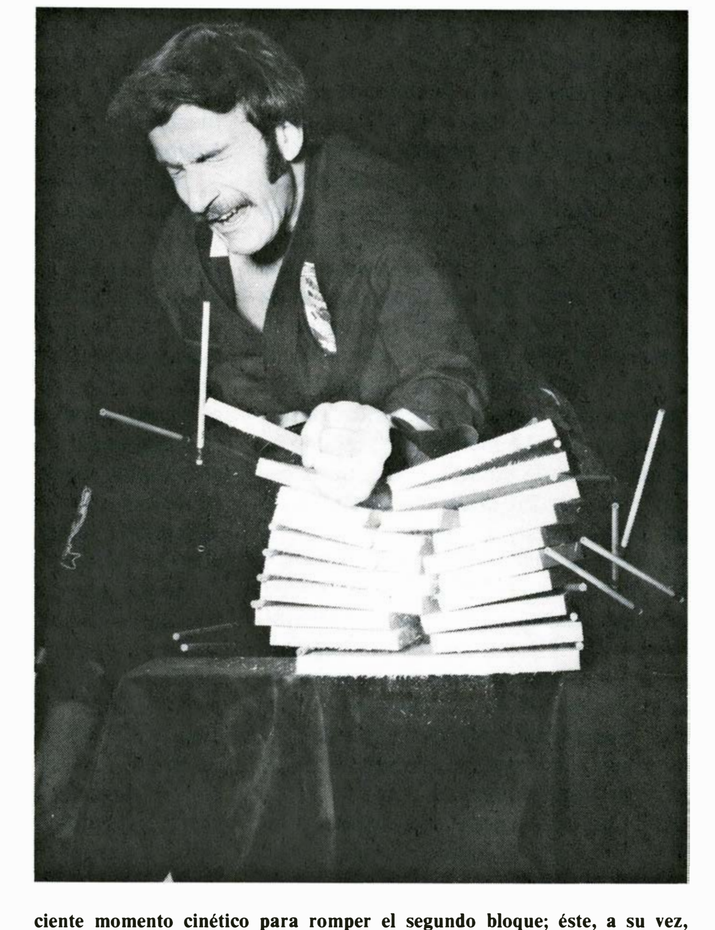
Aunque no está claro que el modelo dinámico describa de una manera precisa el golpe de karate, en el cual las fuerzas son mucho mayores que las encontradas en el funcionamiento de las máquinas que vibran, los resultados son alentadores. El modelo indica que la mano debe alcanzar una velocidad de 6,1 metros por segundo para romper la madera y de 10,6 metros por segundo para romper el hormigón. Tales cifras están de acuerdo con nuestra observación de que los principiantes pueden romper la madera pero no el hormigón. Una velocidad en la mano de 6,1 metros por segundo cae dentro de las posibilidades de un principiante, pero una velocidad de 10,6 metros por segundo requiere un entrenamiento y una práctica. El modelo dinámico también predice correctamente que un bloque de hormigón se rompe en un tiempo inferior a cinco milisegundos.

¿A qué se debe que la mano del karateka no se fracture por la fuerza ejercida en un golpe de karate? Parte de la contestación reside en el hecho de que los huesos son mucho más fuertes que el hormigón. Tengamos en cuenta la facilidad con la que se rompería una pieza de hormigón que tuviera el tamaño y la forma de un hueso. En efecto, el módulo de rotura de un hueso supera, en más de cuarenta veces, al del hormigón. Si se colocara un cilindro de hueso de dos centímetros de diámetro y seis centímetros de longitud sostenido por sus extremos podría soportar una fuerza ejercida en su centro que supera los 25.000 newton. Tal fuerza es ocho veces mayor que la ejercida por el hormigón sobre la mano en un golpe de karate. En realidad, la mano puede soportar fuerzas mucho mayores que la de 25.000 newton, pues no está formada por un solo hueso sino por un conjunto de ellos unidos mediante tejidos viscoelásticos. Además, la mano no está sostenida por sus extremos y golpeada por enmedio, a diferencia del hormigón o de la madera.

Al recibir un impacto, los huesos se mueven y transmiten parte del esfuerzo a los músculos adyacentes y otros tejidos. Parte del esfuerzo es absorbido por la piel y músculos que se encuentran entre el punto de impacto y los huesos. Además, gran parte de la fuerza se transmite a otras regiones del cuerpo. Falta averiguar la fracción del esfuerzo que es absorbida y dónde.

En el martillazo de puño el quinto metacarpiano, el hueso de la base del puño y uno de los más vulnerables al impacto ocasionado por un golpe, está protegido por el músculo llamado abductor del dedo meñique. Cuando el puño entra en tensión, el músculo abductor se pone rígido y más grueso. La primera línea de defensa contra el golpe es la piel. La siguiente es el músculo abductor que actúa como almohadilla absorbiendo parte de la fuerza del impacto. Los tendones de la muñeca absorben luego parte del golpe al flexionar el puño en la muñeca. Finalmente, la energía transmitida al brazo es absorbida por los





OCHO BLOQUES DE MADERA (*izquierda*) rotos por el martillazo de puño de uno de los autores (Feld). Inicialmente, los bloques no estaban yuxtapuestos directamente, uno sobre otro, sino que se mantenían ligeramente separados entre sí mediante lapiceros. Los lápices aseguran una reducción en la fuerza crítica debido a un efecto favorable del momento cinético. Al romperse, el primer bloque absorbe energía procedente del puño. Las dos mitades del bloque roto, al moverse hacia abajo, adquieren suficiente momento cinético para romper el segundo bloque; éste, a su vez, rompe el tercero, y así sucesivamente. Por tanto, la fuerza necesaria para romper los ocho bloques es mucho menor que ocho veces la fuerza necesaria para romper un solo bloque. Un golpe descentrado (*derecha*) no es capaz de romper el bloque de la base en una pila de diez. La onda de fractura se propaga hacia el centro en donde los bloques son más frágiles. En efecto, se pierde mucha energía en este movimiento horizontal hacia el centro.

músculos y otros tejidos en el antebrazo y en el brazo.

En el karate, la posición adecuada de la mano, y lo mismo del pie, cuando se emplea para dar un golpe, es crítica. En muchas operaciones, tales como el golpe con la mano abierta, o la patada lateral, se hace contacto con el borde de la mano o del pie. En estas técnicas, la fuerza se concentra sobre una pequeña área del objeto y con ello se reduce la posibilidad de doblar el hueso hasta el punto de fractura. En efecto, si la parte del cuerpo que golpea está orientada adecuadamente, la fuerza necesaria para fracturarla es mucho mayor que la fuerza necesaria para romper el objeto. Por ejemplo, hemos estimado que, en una patada lateral bien dada, el pie puede soportar una fuerza unas 2000 veces mayor que el hormigón.

Hasta aquí hemos discutido únicamente la rotura de un solo bloque. Los karatekas pueden romper también pilas de bloques de madera y de hormigón. Con un golpe o un puntapié bien ejecutado, un experto en karate puede demoler varios bloques de hormigón colocados sin solución de continuidad uno encima de otro. Incluso pilas más altas de bloques de hormigón (y bloques de madera) pueden ser rotas si los bloques no son apilados directamente uno encima de otro, sino que se mantienen ligeramente separados intercalando clavijas. Las clavijas aseguran una reducción en la fuerza crítica debido a un efecto favorable del momento cinético. Cuando se rompe el primer bloque absorbe energía procedente del puño. A medida que las dos mitades del bloque roto se mueven hacia abajo adquieren momento cinético. El impulso y el momento cinético adquiridos por las piezas rotas son a menudo suficientemente grandes para romper el segundo bloque, los trozos del cual rompen el tercer bloque, y así sucesivamente. Así, por ejemplo, la fuerza necesaria para romper ocho bloques de madera es menor que ocho veces la fuerza que se necesita para romper un solo bloque.

El karateka tiene que actuar adecuadamente golpeando con fuerza cerca del centro. Un golpe un poco desviado puede fracasar para romper toda la pila. Las fotografías muestran que en un golpe de tal naturaleza cada bloque sucesivo que se rompe lo hace cerca de su centro. Parte de la energía de la mano se pierde en el movimiento horizontal de la onda de fractura. Si se pierde mucha energía de este modo puede no quedar suficiente para romper los bloques del fondo de la pila.

Evolución de los trasplantes de córnea

La cirugía de la córnea ha progresado notablemente en el curso de los últimos 25 años. Pero deben investigarse nuevas técnicas y nuevas terapéuticas para el tratamiento de las enfermedades y los traumatismos relativos a la córnea

Joaquín Barraquer

La córnea es la primera lente del ojo y su ventana al mundo. Es transparente y permite el paso de los rayos luminosos. Carece de vasos sanguíneos. Si hacemos un corte transversal de la córnea, observaremos las siguientes capas: el epitelio, que es extremadamente sensible y contiene numerosas terminaciones nerviosas; la membrana de Bowmann, que consiste en un espeso entrecruzamiento de fibrillas colágenas, dispuestas al azar, de un diámetro de 180 angstrom, que pueden presentar estriaciones periódicas; el estroma o sustancia propia, que constituye la mayor parte de la masa de la córnea, alrededor del 90 por ciento de la misma, y consiste en un tejido conjuntivo regular y transparente, cuyos haces forman delgadas laminillas dispuestas en muchas capas; membrana de Descemet, que es una formación vítrea que puede separarse fácilmente de la sustancia propia; y el endotelio corneal, que es un epitelio plano de una sola capa que separa la córnea de la cámara anterior del ojo y se extiende hasta las trabéculas del ligamento pectinado.

La idea de sustituir la córnea patológica, opacificada, no es nueva. Ya en 1789 Pellier de Quengsy propuso sustituir la córnea opaca por un implante de cristal. Los primeros experimentos se llevaron a cabo en conejos en 1818 por Franz Reisinger, quien obtuvo algunos resultados alentadores. En 1835 Bigger sugirió que se deberían emplear córneas humanas, pero durante más de 40 años se utilizaron córneas de animales (conejos, cerdos y perros) para los injertos corneales en ojos humanos, lo que añadió los problemas de rechazo del injerto a las dificultades técnicas del trasplante. Casi un siglo después de la primera publicación de Pellier de Quengsy, von Hippel señaló algunos resultados alentadores en pacientes humanos, empleando córneas humanas frescas y el trépano ideado por él.

Los modernos avances en el campo de la queratoplastia (cirugía de la córnea) se deben a los importantes trabajos realizados por Franceschetti, Paufique, Sourdille, Castroviejo, Rycroft, Paton, José I. Barraquer y otros, que obtuvieron ya resultados muy satisfactorios.

Desde 1950 el pronóstico de los trasplantes corneales ha mejorado considerablemente gracias a una serie de avances técnicos, al mejor conocimiento y control de los procesos biológicos que intervienen en la evolución del trasplante y a un conocimiento más profundo de la patogenia de las complicaciones. Hemos tenido la suerte de poder asistir a la evolución de los trasplantes corneales durante más de 25 años, lo que nos permite comparar la cirugía corneal tal como se practicaba al principio de nuestra época y las grandes ventajas que tenemos en la actualidad para garantizar el éxito de estas intervenciones.

Ha ocurrido así en la anestesia. La anestesia general moderna ha supuesto un gran adelanto en los trasplantes corneales, dado que asegura una relajación adecuada y constante del paciente y una libertad de acción del cirujano, quien no necesita contar con la colaboración del paciente, ya que éste se mantiene perfectamente inmóvil. Así pues, el cirujano puede llevar a cabo todas las maniobras quirúrgicas con la máxima precisión, dedicando toda su atención a los detalles de la intervención.

De un modo parecido han influido beneficiosamente los progresos en la iluminación y el microscopio quirúrgico. Hace 25 años, los trasplantes corneales se practicaban en quirófanos generales, no adaptados a las exigencias de la cirugía ocular, con iluminación cialítica, que resultaba inadecuada para ver en detalle las estructuras intraoculares una vez abierto el globo ocular. Generalmente, el cirujano utilizaba gafas o lupas para lograr una imagen más precisa y aumentada.

Para mejorar la iluminación y visualización de las estructuras intraoculares se introdujeron las lámparas martillo; más adelante se utilizaron lámparas frontales, hasta que finalmente se dio entrada en el quirófano a los microscopios quirúrgicos, especialmente indicados para la cirugía corneal. Actualmente el empleo del miscroscopio con su correspondiente lámpara de hendidura es esencial en la práctica de los trasplantes corneales.

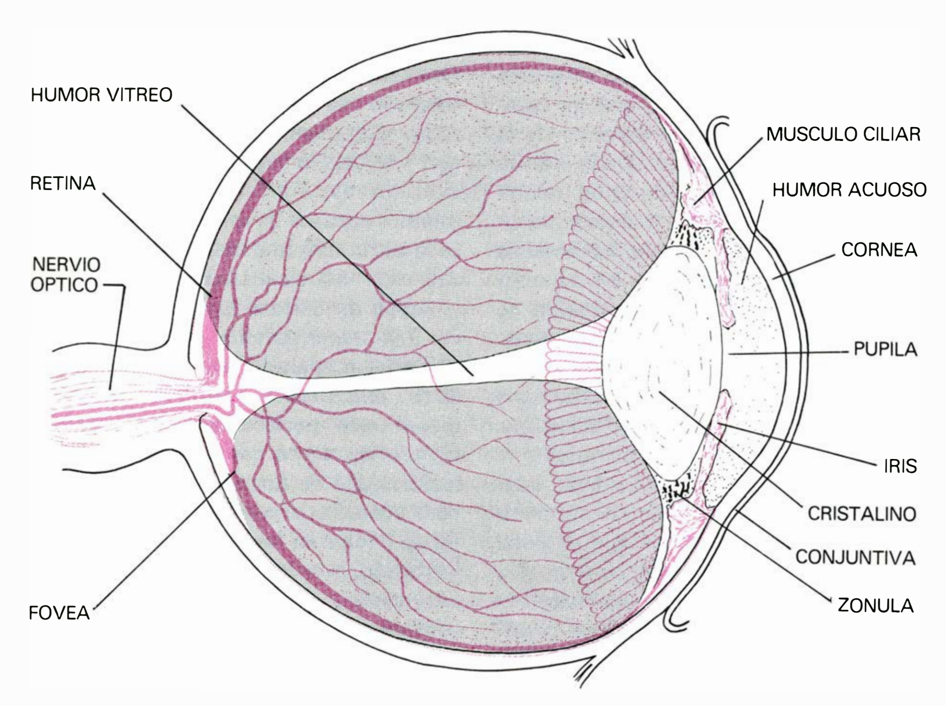
La lámpara de hendidura facilita una iluminación que permite el "corte óptico" de los tejidos transparentes, lo que posibilita una gran precisión. La luz homogénea complementaria resulta esencial para asegurar la iluminación del campo operatorio incluso si la mano del cirujano llegase a interferir una de las iluminaciones durante las maniobras quirúrgicas. El microscopio para el asistente constituye un complemento muy útil, pues le permite seguir toda la operación bajo control microscópico, tal como la ve el cirujano.

El mejor pronóstico actual de los trasplantes corneales se debe, en gran parte, a los progresos realizados en el campo de la selección del material del injerto. La enucleación precoz del ojo dador, dentro de las seis primeras horas después de la muerte, resulta fundamental. Los ojos de donantes afectos de leucemia, hepatitis vírica y alguna otra enfermedad contagiosa no deberían ser utilizados para una queratoplastia.

El examen biomicroscópico del ojo dador es muy importante para determinar el estado de la córnea. Primero se debe determinar que no existan opacida-

des del estroma y de la membrana de Bowmann. Luego se examina detenidamente la membrana de Descemet y el endotelio para asegurarse que no existe distrofia endotelial incipiente y que no hay signos de necrobiosis por conservación inadecuada o un intervalo demasiado prolongado entre la muerte y la enucleación. El epitelio tiene menos importancia pues se regenera a partir del epitelio de la córnea receptora.

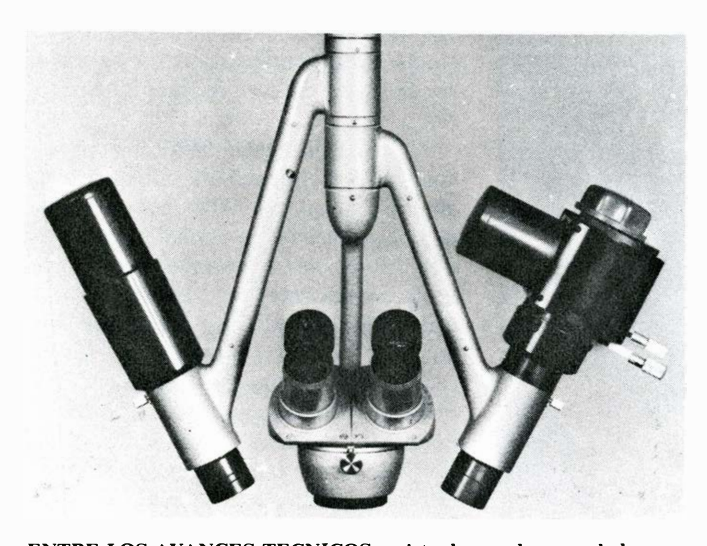
Recojamos, antes de proseguir, algunos progresos registrados en instrumentación y técnica quirúrgica. Aparte de los mejores trépanos, manuales o de motor, de que disponemos en la actualidad, se han realizado notables avances en el campo de la fijación del injerto. Desde que comenzamos a interesarnos por primera vez por la cirugía corneal hemos conocido muchos métodos para lograr la fijación del injerto: colgajo conjuntival para recubrir el injerto y mantenerlo en posición, suturas de contención, recubrimiento con membrana vitelina, lentes de contacto suturadas a los músculos oculares, y otros. Todos estos procedimientos se emplearon antes de disponer de las agujas y material de sutura con que se cuenta en la actualidad.

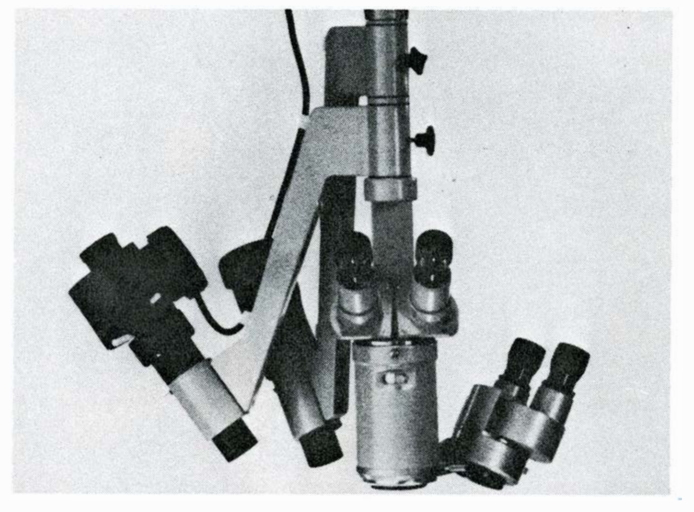


LA CORNEA es la primera lente del ojo y su ventana al mundo. Es transparente y permite el paso de los rayos luminosos. Carece de vasos sanguíneos. Consta de las siguientes capas: epitelio, con numerosas terminaciones nerviosas, membrana de Bowman, estroma, membrana de Descemet y endotelio.

Constituyó un avance considerable el empleo, a partir de 1948, de suturas directas con agujas 81/5 de Grieshaber y seda de Kalt. Sin embargo, el problema de la seda de Kalt era que sólo se toleraba durante 10 a 20 días, provocando una reacción tisular importante, por lo que las suturas se debían extirpar precozmente. La reacción tisular fue causa de un aumento indeseable de la vascularización, y la extirpación precoz de las suturas fue muchas veces responsable de reapertura de la herida. El problema quedó parcialmente resuelto al emplear la seda virgen que permitió dejar las suturas "in situ" durante un período de tiempo mucho más prolongado. Pero el cambio más espectacular se produjo con la introducción de las suturas sintéticas (Tübinger Nahtmaterial), que resultan ser las más apropiadas (Ethilon, Nylon y Perlón, entre otras). El empleo de estas suturas muy finas dio lugar al diseño de agujas mucho más finas, espatuladas, poco traumatizantes para los tejidos. El Perlón, al ser tan fino e inerte, en pocos días queda cubierto por el epitelio corneal y el ojo queda perfectamente tranquilo.

Las suturas deben realizarse pasando por las capas profundas de la córnea, cerca de la membrana de Descemet, pero sin entrar en la cámara anterior. En todo caso es preferible colocar la sutura más bien profunda que demasiado superficial. Importa que el injerto y el lecho receptor queden perfectamente adaptados y al mismo nivel, por lo que se aconseja pasar la aguja por el injerto y el receptor en un mismo movimiento. En los casos de injertos grandes, se colocan ocho suturas radiales de seda virgen y una sutura continua de Perlón, que se pasa dos veces entre cada sutura de seda virgen, de forma que al final habrá un total de 24 puntos. La ventaja principal





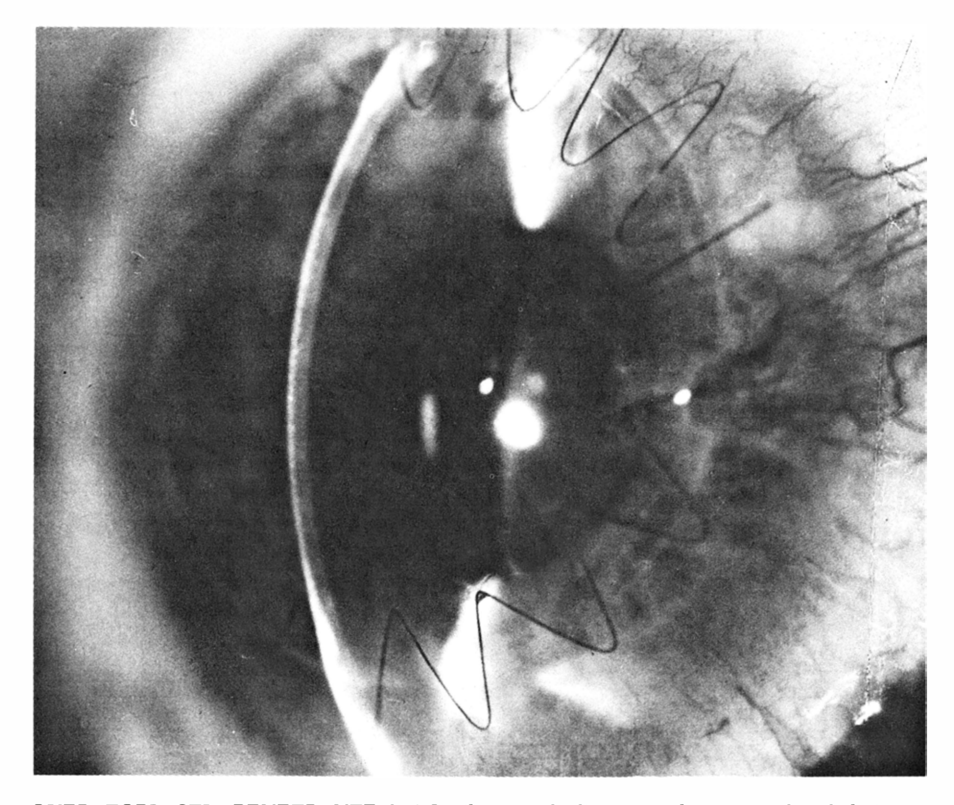
ENTRE LOS AVANCES TECNICOS registrados en el campo de la queratoplastia, cabe destacar los ocurridos en la iluminación y en el microscopio. Hace veinticinco años, los transplantes corneales se practicaban en quirófanos generales, con iluminación cialítica, inadecuada para ver con detalle las estructuras intraoculares, una vez abierto el globo ocular. Para mejorar la iluminación y la visualización se introdujeron las lámparas de martillo. Luego entraron las lámparas frontales y, por último, los microscopios quirúrgicos (microscopio simplificado, *izquierda*, y zoom doble, *derecha*), con su correspondiente lámpara de hendidura. La lámpara de hendidura facilita una iluminación que permite el "corte óptico" de los tejidos transparentes.

de esta técnica de sutura reside en que es perfectamente tolerada, lo que ha cambiado por completo el pronóstico de la queratoplastia penetrante. Dado que la sutura se puede dejar durante mucho tiempo sin que produzca irritación, la cicatrización resulta excelente. Las suturas de seda virgen se extraen a los 12 o 15 días; la sutura continua de Perlón se deja durante tres a cinco meses o más.

Se da preferencia a la combinación de ocho puntos de seda virgen combinados con una sutura continua de Perlón por diferentes razones. En primer lugar, la seda virgen es más fácil de manejar; además, si la sutura continua se rompiera en el postoperatorio, cosa que es poco probable pero que puede ocurrir, los ocho puntos de seda virgen mantendrían el injerto en posición y se podrá colocar otra sutura continua de Perlón. En cambio, si el injerto sólo es mantenido en posición por la sutura continua, si ésta se rompiera el injerto se desprendería del receptor y tendría que sustituirse. Incluso podrían afectarse el iris y el cristalino antes de que se pueda tratar el accidente. Por último, la seda virgen produce una discreta irritación tisular, lo que no es el caso con las suturas de Perlón. Tal irritación debe evitarse cuando persiste durante un tiempo prolongado, pero al principio de la fase de cicatrización es útil para activarla. Dos semanas más tarde, cuando la cicatrización ya está relativamente avanzada, se extraen las suturas de seda virgen y se deja la sutura continua en posición durante 3-5-7-12 meses, hasta que estemos seguros de que el endotelio, que es la estructura que más tarda en cicatrizar, esté bien cicatrizado.

Antes de extraer la sutura continua en una queratoplastia penetrante, hay que estar preparado por si la herida pudiera entreabrirse, aunque aparentemente esté perfectamente cicatrizada. Especialmente en casos de queratocono (deformidad de forma cónica de la córnea), distrofia corneal hereditaria y distrofia de Fuchs, en los que no existe vascularización periférica, la cicatrización es muy lenta y es preferible dejar la sutura continua en posición durante seis meses o más. Para reconocer la fase relativamente avanzada de la cicatrización, debe buscarse un fino anillo blanco alrededor de la cicatriz, que no hay que confundir con ningún edema. En cambio, si todavía persiste algo de edema, ello constituye un signo de que la cicatrización todavía no está completa.

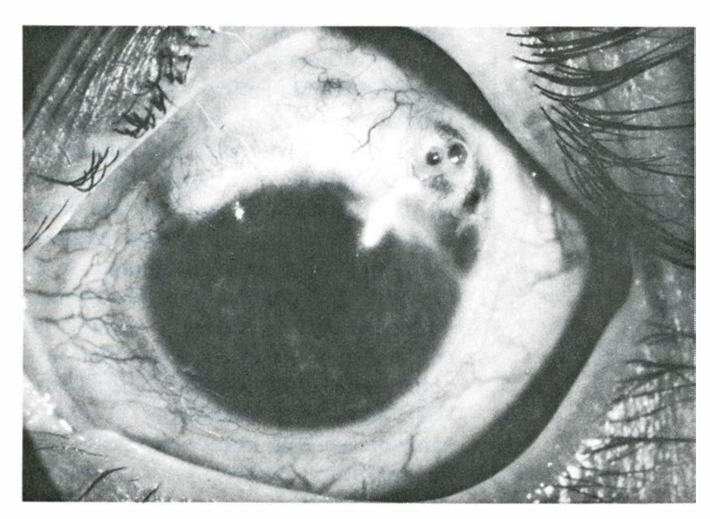
No sólo la técnica, los microscopios, las agujas, las suturas y la experiencia quirúrgica más amplia han contribuido a modificar el pronóstico del tratamiento quirúrgico de las enfermedades de la córnea. Son fundamentales asimismo los progresos en terapéutica médica y el mejor conocimiento de los procesos biológicos en los trasplantes. Queremos insistir en este sentido en el importante papel representado por los antibióticos. Sin descontar el relieve que obtienen en queratoplastia los corticosteroides en razón de su efecto antiinflamatorio, su efecto inhibidor de la vascularización, su actividad inmunodepresora, real aunque no muy marcada, y su acción antialérgica por inhibición de la formación de histamina (al contrario de lo que ocurre con los antihistamínicos, que actúan directamente sobre la histamina ya formada).

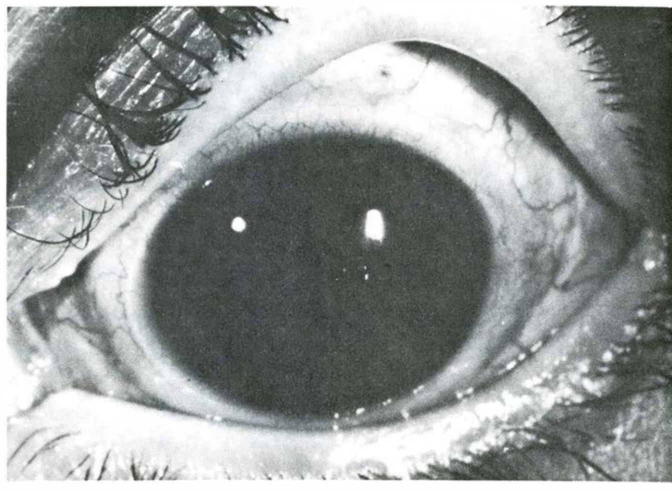


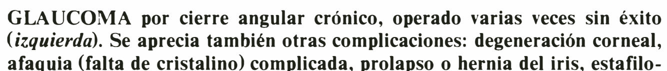
QUERATOPLASTIA PENETRANTE de 8,5 milímetros de diámetro, a los sesenta días de la intervención. La sutura continua de Perlón está todavía en posición y perfectamente tolerada. La aposición de los bordes de incisión es excelente tanto a nivel del epitelio como del endotelio. Dejando la sutura de Perlón en posición durante dos o tres meses, se evita la entreabertura endotelial, previniendo de esta forma un posible edema tardío del injerto, que se podría confundir con un rechazo del homoinjerto.

Desde que disponemos de los corticosteroides antiinflamatorios el pronóstico de la queratoplastia penetrante ha mejorado mucho y con su empleo se ha demostrado que la reacción inmunológica como causa de la opacificación del injerto es menos frecuente de lo que se pensaba. En muchos casos en los que antes se suponía un rechazo por factores inmunológicos, el fracaso se debía probablemente a una técnica deficiente, una aplicación incorrecta de las suturas, accidentes durante la extracción de las mismas, extracción demasiado precoz de las suturas, defectos de la obtención del injerto o material de injerto defectuoso por conservación inadecuada en el banco de ojos o durante el transporte, etcétera. Se pensó que la opacificación del injerto, antes llamada "enfermedad del injerto" o "hipotrofia", representaba invariablemente una reacción inmunológica y que el injerto se opacificaba porque no era admitido por el organismo receptor. En cambio, los progresos realizados en el campo de la inmunología demostraron que el verdadero rechazo del injerto es poco frecuente, y, cuando ocurre, puede ser tratado adecuadamente obteniéndose, en la mayoría de los casos, un resultado satisfactorio.

La reacción inmunológica se manifiesta principalmente por la aparición de edema e hiperemia. Aparecen precipitados blanquecinos en el endotelio del injerto que no se observan en el endotelio de la córnea receptora. Está muy indicado el tratamiento con corticosteroides en estos casos y generalmente es suficiente para dominar la reacción inmunológica. En algunos casos puede ser necesario añadir inmunodepresores (Imurel) bajo la estricta vigilancia del internista y repitiendo los análisis de laboratorio cada 15 días. Una vez que los fenómenos activos hayan desaparecido, el paciente debe permanecer bajo control oftalmológico frecuente durante por lo menos 2-3 años, si persiste un dis-







GLAUCOMA por cierre angular crónico, operado varias veces sin éxito (*izquierda*). Se aprecia también otras complicaciones: degeneración corneal, afaquia (falta de cristalino) complicada, prolapso o hernia del iris, estafilomas, incarceración del vítreo, cámara anterior plana, incisión fistulizada e hipertensión ocular a pesar del tratamiento médico máximo. Resultado un año después de un autoinjerto conjuntivoesclerocorneal de 14 mm (*derecha*).

creto edema, y se debe continuar el tratamiento con corticosteroides durante un período prolongado, vigilando la posible aparición de una catarata subcapular posterior central y controlando periódicamente la presión intraocular para detectar la aparición de un posible glaucoma cortisónico, lo que obligaría a suspender este tratamiento. Asimismo bajo estricto control del internista, pueden continuarse los inmunodepresores a dosis mínimas, que no tendrían este inconveniente.

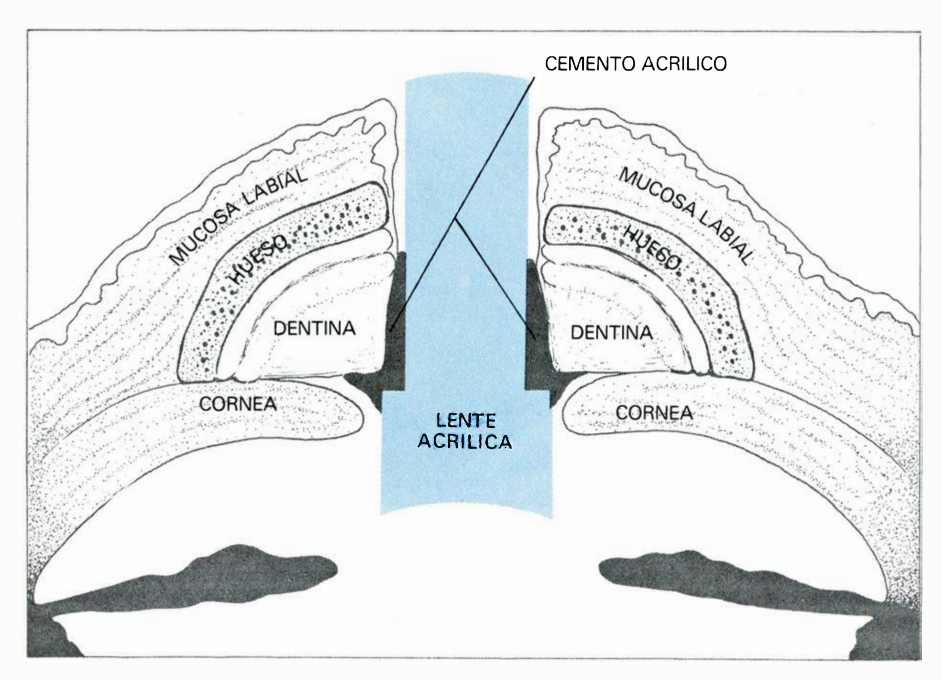
Se pensó que el diámetro del injerto tendría alguna influencia sobre la frecuencia de las reacciones inmunológicas. No cabe duda que cuanto mayor sea el diámetro del injerto más tejido homoplástico se introduce en el organismo receptor, lo que hace más probable la reacción inmunológica. En este sentido, también debe tenerse en cuenta el diámetro original de la córnea receptora en proporción con el diámetro del injerto. Para algunos ojos, un injerto de 8 milímetros puede resultar relativamente pequeño; en cambio, en otros ojos con córnea pequeña, un injerto de 7,5 milímetros puede resultar relativamente grande.

Es muy importante el control postoperatorio riguroso. Los pacientes operados de queratoplastia deben ser examinados con la lámpara de hendidura cada día, incluso los domingos y días festivos. Inmediatamente después de la operación debe iniciarse el tratamiento antiinflamatorio profiláctico con corticosteroides por vía general y local. Al final de la operación de trasplante se inyectan corticosteroides por vía subconjuntival. Esta inyección se repite si aparecen signos de reacción inmunológica, lo que, aunque poco frecuente, puede ocurrir en cualquier momento entre los 15 días y 3 años.

En cualquier caso de edema postoperatorio del injerto, cuando el tratamiento médico intenso (antibióticos, corticosteroides, inmunodepresores) no produce la respuesta deseada en un espacio de tiempo relativamente corto, estaría indicada la sustitución precoz del injerto, antes de que se desarrolle una vascularización importante de la córnea receptora, que empeoraría el pronóstico de una futura sustitución del injerto. En pacientes ancianos, debe practicarse simultáneamente la extracción del cristalino por las razones siguientes: se trabaja sobre un ojo con un endotelio muy delicado y, suponiendo que el injerto se mantenga transparente, si luego hemos de practicar otra operación para extraer la catarata (opacidad del cristalino) existe un riesgo incrementado de que el endotelio sufrirá durante la segunda intervención. Así pues, dado que hemos de abrir el ojo, de todas formas, es preferible extraer el cristalino en todos los pacientes mayores de 70 años en los que se sospecha que se tendrá que extraer el cristalino dentro de tres o cuatro años.

En los casos de muy mal pronóstico con extensas alteraciones corneales, en los que un homoinjerto se opacificaría invariablemente, se pueden obtener buenos resultados con un autoinjerto, empleando la córnea del otro ojo, ciego o ambliope, del mismo paciente, si la córnea está en condiciones aceptables. La foto izquierda superior muestra el ojo izquierdo de una paciente de unos 40 años de edad que había sido operada en su país varias veces de glaucoma y de extracción del cristalino por glaucoma maligno. Presentó degeneración corneal, afaquia complicada con prolapso de iris y estafilomas, incarceración de vítreo en la incisión, cámara anterior aplanada e hipertensión ocular a pesar del tratamiento médico máximo. El ángulo camerular estaba completamente cerrado por goniosinequias. El otro ojo estaba ciego por glaucoma, pero nunca había sido operado, de suerte que la córnea se conservaba en condiciones aceptables. Se practicó un autoinjerto conjuntivo-esclero-corneal de 14 milímetros, extirpando además los restos del iris que estaba muy alterado. (La ilustración superior de la derecha muestra el resultado un año después.) La visión es de 0,2 lo que se considera bueno para un caso de tan mal pronóstico. La tensión ocular era normal a pesar del gran diámetro del trasplante.

Si no se puede utilizar la córnea del otro ojo para el trasplante, cabe acudir como último recurso a la inclusión de una queratoprótesis, cuando se sabe que un homoinjerto no se mantendría transparente o cuando ya han fracasado una o varias homoqueratoplastias. Nuestra experiencia personal con las queratoprótesis comenzó en noviembre de 1955, y aunque se obtuvieron algunos resultados favorables, persiste el problema de que se trata de la *inclusión* de una lente acrílica en los tejidos y no de un *injerto* que es incorporado en los tejidos. El pronóstico es muy reservado, dada la ausencia de cicatrización con el consiguiente peligro de infección por penetración de gérmenes patológicos en el interior del ojo y el peligro de extrusión de la prótesis por necrosis de los tejidos circundantes. Sin embargo, estos enfermos ya no tienen nada que perder y, en algunos de nuestros casos, la prótesis se mantuvo en posición durante 10 y 15



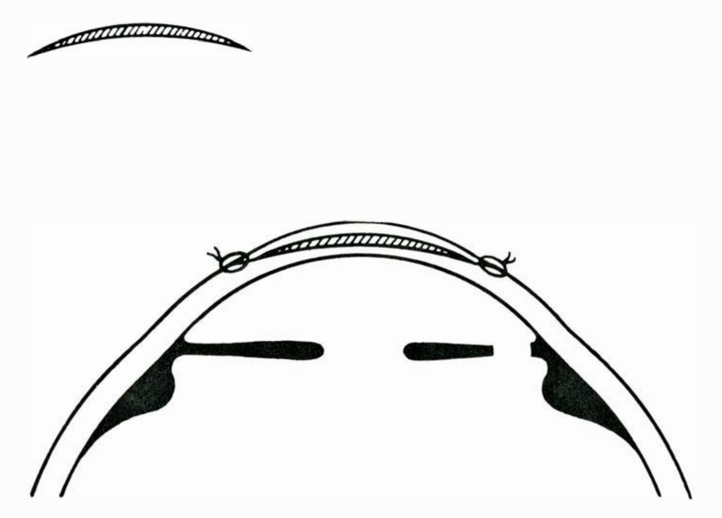
OSTEO-ODONTO-QUERATOPROTESIS. Para evitar que la prótesis fuera expulsada, Strampelli desarrolló un procedimiento biológico: la osteo-odonto-queratoprotesis. Consiste en la resección de una raíz dental del paciente junto con el hueso adyacente del maxilar superior. La prótesis se inserta bajo un autoinjerto de mucosa bucal practicado en una primera fase, que asegura una buena vascularización y cicatrización de la mucosa al periostio. Luego se aplica una lente de contacto cosmética.

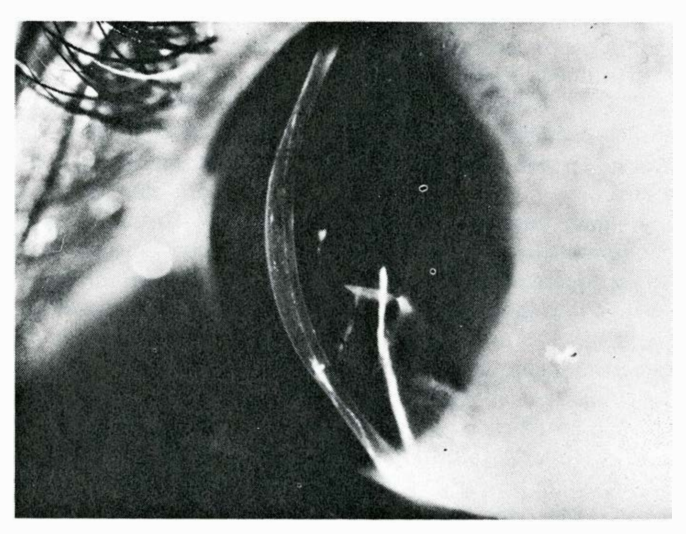
años, con resultado satisfactorio. En cambio, en otros casos la prótesis fue expulsada a los dos o tres meses después de la operación a pesar de la tolerancia inicial excelente.

Para evitar estos problemas, Strampelli desarrolló un procedimiento más biológico, la osteoodontoqueratoprótesis. Este método consiste en la resección de una raíz dental del mismo paciente junto con el hueso adyacente del maxilar superior. A partir de este bloque resecado, se obtiene una prótesis que comprende el periosteo, hueso y raíz dental y se fija en su centro un cilindro óptico acrílico, utilizando cemento dental. La prótesis se inserta debajo de un autoinjerto de mucosa bucal practicado en una primera fase, y que asegura una buena vascularización y cicatrización de la mucosa al periostio. Más tarde, se aplica una lente de contacto cosmética para mejorar el aspecto del ojo. Esperamos, sin embargo, que con los progresos que se realizan en el campo de los fármacos, de las lentes de contacto blandas, etcétera, que el número de casos que pueden mejorar con un injerto corneal aumentará constantemente y que cada vez se tendrá que recurrir menos a estos procedimientos drásticos de queratoprótesis.

Finalmente mencionaremos las técnicas desarrolladas por mi hermano José I. Barraquer, que abren un nuevo campo a la cirugía corneal: la cirugía de la refracción corneal mediante queratomileusis y queratofaquia. La técnica de la queratofaquia consiste en la inclusión intralaminar de una "lente homoplástica viva", obtenida cortando una córnea dadora congelada con un torno hasta darle la forma deseada. Se practica una disección intralaminar en la córnea receptora como en la queratoplastia laminar, se incluye el disco dador entre las láminas corneales y se vuelven a suturar las capas corneales superficiales en su posición original. La fotografía inferior (*derecha*) demuestra claramente el engrosamiento central, la reducción del radio de curvatura corneal y el correspondiente aumento de la refracción corneal de este ojo afáquico, que corresponde a un niño pequeño operado de catarata e iridectomía en sector. Gracias a la operación de queratofaquia, este ojo volverá a ser un ojo funcionalmente útil, ya que en los niños pequeños resulta difícil adaptar una lente de contacto para llevarla continuamente a una edad en que la visión todavía se está desarrollando. Esta intervención se halla todavía en fase experimental y se practica en pocos centros especializados.

En conclusión, podemos decir que la cirugía de la córnea ha progresado considerablemente en el curso de los últimos 25 años pero todavía queda mucho por hacer. La investigación debe continuar para intentar encontrar nuevas técnicas y terapéuticas al objeto de ayudar al gran número de pacientes que están ciegos por enfermedades o traumatismos corneales y que podrían ver de nuevo, si se lograse sustituir su córnea opaca por un injerto o una prótesis que se incorporara en forma permanente en el ojo, manteniendo su transparencia.





TECNICA DE QUERATOFAQUIA, de José I. Barraquer. Consiste en la inclusión intralaminar de una lente homoplástica viva, obtenida cortando una córnea dadora congelada con un torno hasta darle la forma deseada. Se practica una disección intralaminar en la córnea receptora, se incluye el disco dador entre las láminas corneales y se suturan las capas corneales superficiales. La fotografía muestra su aplicación a un ojo infantil.

Juegos matemáticos

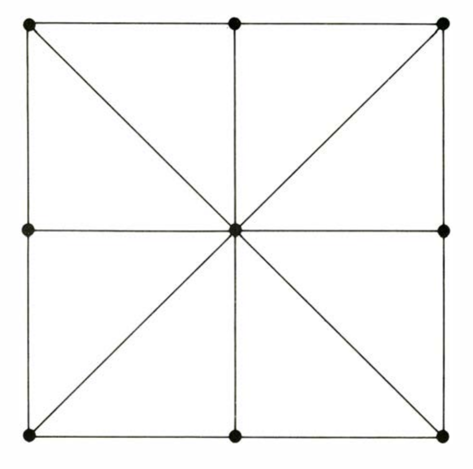
Donde los expertos en tatetí pueden perseguir caza mayor

Martin Gardner

Entre los juegos de lápiz y papel, todavía el tatetí (o tres en raya) es uno de los más sencillos, más populares y más antiguos de los conocidos. Los especialistas en matemática combinatoria, muy frecuentemente con ayuda de ordenadores electrónicos, continúan explorado insólitas variantes e insospechadas generalizaciones. Una de estas variantes, que se remonta a tiempos muy lejanos, se juega sobre un tablero de tres por tres. Los jugadores reciben tres piezas cada uno, y van colocándolas por turno en el tablero y después van moviendo de casilla en casilla hasta que uno de ellos consigue poner en fila sus tres fichas. La versión anterior sirve de inspiración a muchos juegos comerciales modernos, como el *Teeko*, de John Scarne, o uno nuevo llamado *Touché,* donde unos imanes ocultos hacen que las piezas se den la vuelta, convirtiéndose así en piezas del contrario.

Es evidente que el tatetí nomal puede generalizarse a campos de juego mayores. Así, por ejemplo, el antiguo juego japonés llamado go-moku ("cinco piedras") es en esencia un tatetí de cinco-en-raya que se juega sobre un tablero de go. Otro posible camino sería jugarlo sobre "tableros" de tres o más dimensiones.

En marzo de 1977 se le ocurrió a John Harary un nuevo y delicioso procedimiento para generalizar el tatetí. Harary es un matemático cuyo tiempo se reparte entre el departamento de exactas de la Universidad de Michigan y el Instituto de Investigación social de esa misma universidad. Ha sido apodado "Mr. Teoría de Grafos", en razón de su infatigable y original trabajo en este campo, situado a caballo entre la combinatoria y la topología, y que se encuentra en rápido desarrollo. El año pasado, Harary dio una conferencia en la ciudad alemana de Xanten, completando de esta forma una lista de unas 150 ciudades no pertenecientes a los Estados Unidos que contiene nombres de todo el alfabeto, desde *A* hasta *Z.* Es fundador y editor del *Journal of Graph Theory,* y autor del libro *Graph Theory,* considerado en todo el mundo obra fundamental sobre el tema. Sus artículos sobre teoría de grafos, entre los escritos por él y los realizados en colaboración con otros matemáticos, pasan de 300. El tatetí de Harary, nombre que daré a su generalización de este antiguo juego, abre nuevas y fascinantes posibilidades en matemática recreativa. Este mes resumiré, con permiso de Harary, algunos de los resultados más importantes obtenidos hasta la fecha.



El tatetí como juego de coloración de un grafo

Empezaremos observando que el tatetí ordinario puede considerarse como juego grafo-geométrico bicolor, del tipo que Harary llama juegos de consecución. Sustituyamos las nueve casillas del tablero de tatetí por nueve puntos unidos por líneas rectas, como muestra la figura de la izquierda. Se le asigna un color a cada contrincante, y éstos van por turno coloreando puntos del grafo. El primero que consiga colorear de su color tres puntos de una línea recta gana la partida. Esta versión del juego es claramente isomorfa al tatetí ordinario, que como es bien sabido acaba en empate si ambos jugadores efectúan las jugadas oportunas.

Preguntémonos: ¿Cuál ha de ser el mínimo tamaño del cuadrado necesario para que el primer jugador pueda forzar su victoria, pintando tres puntos alineados? Es fácil demostrar que el cuadrado ha de tener lado cuatro. Harary da a la longitud del lado el nombre de número de tablero del juego, *b.* Este número está íntimamente relacionado con el número de Ramsey, de la teoría de grafos de Ramsey generalizada, número que tiene importante papel en los juegos de Ramsey discutidos en esta sección de *Investigación y Ciencia* en enero de 1978. (La teoría de Ramsey es campo al que Harary ha contribuido –y lo sigue haciendo– con importantes aportaciones. En un artículo de 1972, donde presentaba una panorámica de la teoría de Ramsey, Harary propuso por vez primera el estudio general de los juegos realizados sobre grafos coloreando las líneas del grafo.) Ahora que tenemos determinado el valor de *b*, podemos hacernos una segunda pregunta: ¿cuál es el mínimo número de jugadas que precisa el primer jugador para asegurar su victoria? Unos cuantos garabatos indican que, en el tablero de lado cuatro, el primer jugador puede forzar su mano en tres movimientos. Harary llama a esta cifra número de movimientos del juego, *m.*

Cuando un jugador gana una partida de tatetí, sus piezas definen un poliominó recto de orden 3, conectado por lados o por vértices. (La figura conectada por vértices resulta de tomar tres casillas de una diagonal.) En las ilustraciones de las dos páginas siguientes se representan poliominós de orden 1 a 5. La terminología sobre poliominós fue acuñada por Solomon W. Golomb, el primero que estudió con detalle estas figuras. Harary prefiere seguir la costumbre de algunos trabajos anteriores sobre la materia, y llamarlos "animales". En esta ocasión me adaptaré a su terminología.

Estamos ahora listos para explicar la feliz generalización de Harary. Elijamos un animal de orden cualquiera, y propongamonos un juego análogo al tatetí cuyo objeto declarado sea construirlo. Jugaremos como se suele hacer en el tatetí, no pintando de colores los nudos de un grafo, sino marcando las casillas de una matriz cuadrada con cruces y ceros, o pintando las casillas de rojo y verde, como se hacía con los lados del grafo de un juego de Ramsey. Los jugadores van señalando o pintando casillas, intentando que lleguen a formar el animal deseado. El animal será válido cualquiera que sea su orientación, y si es asimétrico, en cualquiera de sus imágenes especulares.

Nuestra primera tarea consiste en determinar el número de tablero para el animal, es decir, la longitud exacta del lado del cuadrado mínimo donde el

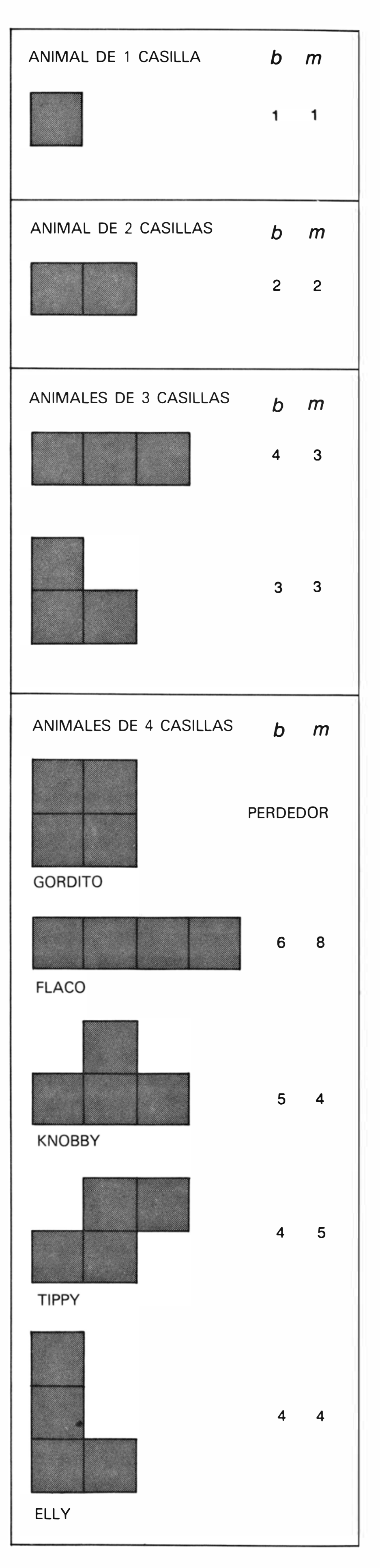
primer jugador puede –si actúa con la estrategia óptima– asegurarse la victoria. Cuando dicho número existe, se dice que el animal es ganador; entonces seguirá siéndolo en todos los tableros cuadrados de tamaño mayor. Si tal número de tablero no existe, se dice que el animal es perdedor. Cuando el animal elegido como objetivo del juego sea perdedor, el segundo jugador puede siempre asegurarse un empate, pero nunca podrá forzar la victoria para sí. La demostración de que así sucede es muy conocida, y válida para todos los juegos de tipo tatetí. Supongamos que el segundo jugador dispusiera de estrategia vencedora. El primer jugador podría "robarle" la estrategia haciendo en primer lugar una jugada irrelevante (lo que nunca puede serle desventaja) y jugando seguidamente la estrategia ganadora. Esta observación contradice la hipótesis de que el segundo jugador posee estrategia ganadora, y por tanto, dicha hipótesis ha de ser falsa. Por tanto, el segundo jugador nunca puede asegurarse la victoria. Si el animal es ganador, y una vez conocido el valor de *b*, buscaremos seguidamente *m*, que es el número mínimo de jugadas necesarias para garantizar la victoria.

Para el animal de una casilla (el monominó), que es trivialmente ganador, *b* y *m* son ambos iguales a 1. En el caso de que –como aquí sucede– el número *m* sea igual al número de cuadrículas del animal, Harary dice que el juego es económico, pues el jugador puede ganar sin necesidad de tomar ninguna casilla que no pertenezca al animal. El juego cuyo objetivo sea el único animal de dos casillas (el dominó) es casi tan trivial como el anterior. También es económico, siendo *b* y *m* ambos iguales a dos. Los juegos correspondientes a los dos animales de tres cuadrículas (los trominós) son ligeramente más difíciles de analizar, aunque el lector demostrará fácilmente que ambos son económicos: para el animal de tres cuadros en forma de *L*, *b* y *m* son ambos iguales a tres, mientras para el rectilíneo de tres casillas, *b* es igual a cuatro y *m* es tres. Este último juego es idéntico al tatetí ordinario, excepto en que las hileras diagonales, conectadas por los vértices, no cuentan como victorias.

El proyecto se hace verdaderamente interesante al estudiar los animales de cuatro cuadrículas (los tetrominós). Harary les ha puesto nombre a los cinco animales de orden cuatro, como muestra la ilustración de esta página. Nótese que Gordito (el tetrominó cuadrado) no lleva valores de *b* y *m;* así ocurre por ser perdedor. Los lectores pueden entretenerse en demostrar que los valores dados son correctos. El primero en demostrar que el primer jugador no puede asegurarse la construcción de Gordito por grande que sea el tablero, ni aún en un tablero infinito, fue Andreas R. Blass, uno de los colegas de Harary en Michigan. El resultado de Blass fue la primera sorpresa de la investigación de las propiedades del tatetí de Harary. De su descubrimiento se deduce inmediatamente que todo animal donde quepa un cuadrado de dos por dos es también perdedor: basta que el segundo jugador adopte una estrategia que impida la construcción de Gordito. De forma más general: todo animal que contenga un animal perdedor de orden inferior es a su vez perdedor. A los perdedores que no contienen perdedores de orden más pequeño, Harary los ha denominado perdedores fundamentales. Gordito es el perdedor fundamental mínimo.

La demostración de que Gordito es perdedor es tan sencilla y elegante que podemos explicarla rápidamente. Imaginemos un plano infinito pavimentado con dominós, en la forma que se ve en la parte superior de la figura de la página 101. Cualquiera que sea el lugar donde se trace un Gordito, forzosamente contendrá un dominó. Por tanto, la estrategia del segundo jugador consiste sencillamente en responder a cada jugada de su oponente ocupando la otra casilla del mismo dominó. En consecuencia, el primer jugador nunca podrá completar un dominó, y por consiguiente, tampoco podrá cerrar un Gordito. Si un animal es perdedor en un tablero infinito, también lo será en todo tablero finito. Por consiguiente, Gordito será perdedor en todos los casos.

Trabajando solamente con las cuatro primeras teselaciones de la página 101, Harary y sus colaboradores establecieron a principio del año pasado que de los 12 animales de cinco casillas, todos excepto tres son perdedores. De entre estos nueve, el único no fundamental es el que contiene a Gordito. Respecto de los 35 animales de seis casillas, todos salvo cuatro contienen perdedores fundamentales de órdenes más pequeños. De estos cuatro posibles ganadores que todavía quedan, se puede demostrar con ayuda de alguna de las pavimentaciones de la ilustración que tres son perdedores. Junto a cada pauta de teselación se muestran los animales cuyo carácter de perdedor fundamental se ha establecido mediante esta pauta. La demostración es en todos los casos la misma: es imposible trazar el perdedor sobre la pauta de teselación correspondiente (que se supone infinita) sin incluir un dominó; por



Animales de 1 a 4 casillas

b m

PERDEDOR

PERDEDOR

PERDEDOR

PERDEDOR

PERDEDOR

PERDEDOR

b m

PERDEDOR

PERDEDOR

PERDEDOR

GANADORES

6 9

6 9

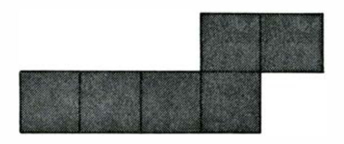
6 6

Los 12 animales de 5 casillas

consiguiente, el segundo jugador puede siempre impedir que el primero llegue a construir el animal siguiendo la misma estrategia ya descrita para bloquear la formación de Gordito. Hay en total 12 perdedores fundamentales de orden 6 o menor.

Vale la pena reseñar que la demostración por teselado de que el animal recto de cinco cuadrículas es perdedor fundamental (otra de las demostraciones descubiertas inicialmente por Blass) está relacionada con el juego de go-moku. Si el objetivo del juego se reduce a conseguir una línea horizontal o vertical de cinco cuadros (no se admiten por tanto victorias en diagonal), el segundo jugador puede siempre forzar un empate. Parece ser que admitiendo victorias en diagonal el primer jugador puede conseguir ganar siempre, aunque esto, que yo sepa, no se ha demostrado todavía ni siquiera en tableros mayores que el de go.

El único animal de seis casillas que pudiera ser ganador es el que Harary y sus colegas matemáticos llaman Sierpe:



Si bien todavía no han podido probar que este animal sea ganador, sí están convencidos de que su número de tablero no excede de 15, y que su número de movimientos no es mayor que 13. El problema pendiente más notable relativo al tatetí de Harary está en demostrar estos asertos. Quizás algún lector consiga demostrar que Sierpe es perdedor, o por el contrario, encontrar una estrategia que le permita al primer jugador imponerlo en un tablero cuadrado, y si es así, determinar sus número de tablero y de movimientos.

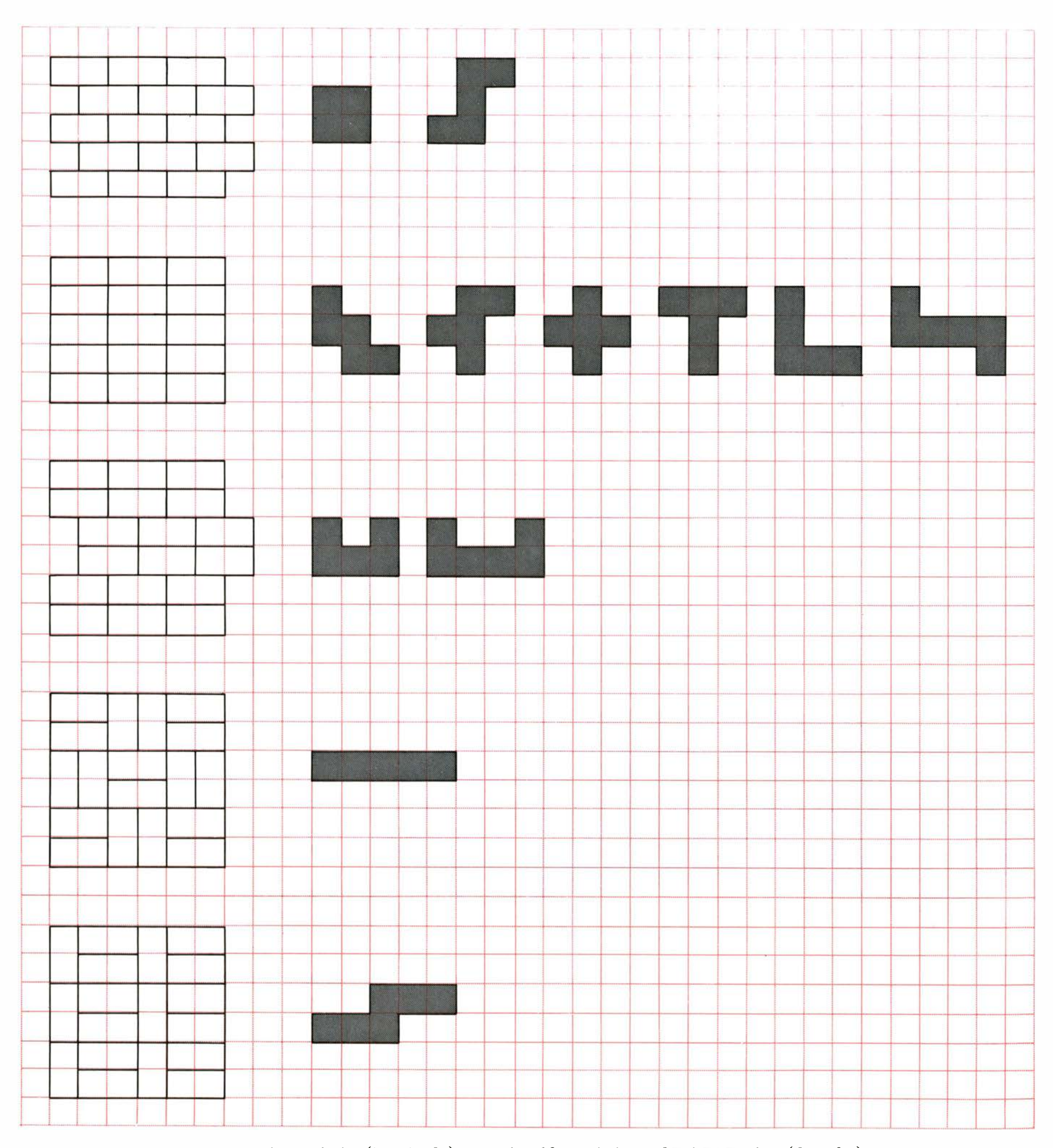
Se sabe que la totalidad de los 107 animales de orden 7 son perdedores. Por tanto, puesto que todo animal de orden superior ha de contener alguno de orden 7, podemos decir confiadamente que a partir el orden 6 ya no hay ganadores. Si la Sierpe lo fuese, como conjeturan Harary y su ayudante George A. Exoo, habría exactamente una docena de ganadores –de ellos, la mitad económicos– y una docena de perdedores fundamentales.

Cualquier animal de 4 o 5 casillas puede servir para un agradable juego con lápiz y papel. Si ambos jugadores conocen a fondo el análisis del problema, entonces, según el animal elegido, o bien vencerá el primer jugador en todas las partidas, o bien el segundo podrá imponer un empate. No obstante, cuando no se tiene un conocimiento tan completo, el juego puede ser entretenido, como ocurre en el tatetí ordinario entre jugadores poco expertos. Si el animal elegido como propósito del juego fuese un ganador, lo mejor es utilizar tableros de lado b o b-1. (Recordemos que el cuadrado de lado b-1 es el máximo tablero donde el primer jugador no puede asegurarse la victoria.)

Todas las variantes y generalizaciones del tatetí de Harary propuestas hasta ahora son, como dijo él mismo en una ocasión, "Ramseyficaciones". Por ejemplo, cada juego tiene una versión negativa (misère), en la que ahora un jugador vence obligando al contrario a colorear el animal elegido. (Con la terminología de Harary, se trata de juegos de evitación.) Solamente se conocen cuatro animales que no den empates en juegos de evitación. Los más pequeños son el monominó y el dominó. Si el "objetivo" es un dominó, el segundo jugador puede

asegurar su victoria en todo tablero rectangular (incluidos los cuadrados) cuyos lados sean al menos de longitud 2. La estrategia victoriosa para el segundo jugador consiste en imaginar el tablero escaqueado –como si fuese un damero– y responder al movimiento de apertura de su oponente ocupando cualquier casilla del mismo color. A partir de ahí, basta que vaya ocupando las casillas de ese color, hasta que se agoten. El lector encontrará sin duda interesante dar una demostración rigurosa de la eficacia de la estrategia recién expuesta.

En tableros cuadrados también es posible obligar al primer jugador a completar el animal de 3 casillas y forma de *L*. Evidentemente, la longitud del lado del cuadrado ha de ser por lo menos tres para que el problema tenga sentido. Cuando el lado es de longitud impar, el segundo jugador podrá vencer sin más que ocupar tras cada jugada del primero la casilla simétricamente opuesta a ella respecto al centro del tablero. Si el primer jugador evita ocupar el centro del tablero, se verá obligado a tomarlo en su última jugada, y entonces perderá. Si el primer jugador ocupa el centro en algún momento del desarrollo del juego sin por ello perder la partida, el segundo debe responder a esa jugada ocupando cualquier posición segura. Supongamos que



Pautas de teselado **(izquierda)** *para los 12 perdedores fundamentales* **(derecha)**

entonces el primer jugador decida ocupar la casilla simétrica respecto al centro de la recién ocupada por el segundo: éste debe responder con cualquier movimiento seguro, y así sucesivamente. En el momento en que el primer jugador deje de jugar "por simetría", el segundo debe volver a utilizar su primitiva estrategia. Si el lado del cuadrado es de longitud par, el anterior sistema de juego produce tablas, pero apelando a una táctica algo más complicada, el segundo jugador puede todavía vencer.

En tableros cuadrados no es posible obligar al primer jugador a ocupar el animal recto de tres celdillas. La demostración de tal propiedad es algo difícil, incluso para el cuadrado de tres por tres; pero de este resultado se deduce que ningún animal mayor, que contenga al espécimen recto de tres casillas, podrá serle impuesto al primer jugador en tableros cuadrados. (La situación es análoga a la de los perdedores fundamentales de los juegos de consecución). Por consiguiente entre los animales de cuatro casillas, únicamente Gordito y Tippy podrían dar empates. Puede demostrarse que Gordito da empates en todo tablero cuadrado; en cambio, sobre tableros de orden impar siempre es posible obligar al primer jugador a construir un Tippy. El análisis exhaustivo de todos los juegos de evitación con animales se encuentra todavía en sus primeros pasos, y según parece presenta difíciles problemas.

Harary ha propuesto otras muchas variantes no triviales de los juegos básicos con animales. Por ejemplo, el objetivo de un juego podría ser la formación de dos o más animales diferentes. En tal caso, el primer jugador puede proponerse la construcción de uno de ellos, y el segundo jugador, la del otro; o bien ambos jugadores pueden intentar construir uno cualquiera de ellos. Además, en un mismo juego pueden combinarse los problemas de consecución y evitación; también es posible utilizar tableros no rectangulares. Por otra parte, en cualquiera de estos juegos pueden enfrentarse tres o más jugadores, aunque esta versión suscita coaliciones de juego entre los contrincantes, y el análisis resulta enormemente complicado. Es también posible modificar las reglas, y aceptar animales conectados por vértices o a la vez por vértices y lados. Evidentemente, en el límite podríamos proponer como objetivo de juegos del tipo tatetí configuraciones completamente arbitrarias, pero tan amplias generalizaciones suelen conducir a juegos demasiado complicados para resultar interesantes.

Otra posible dirección en que generalizar estos juegos podría consistir en jugarlos con poliamantes (conjuntos de triángulos equiláteros idénticos unidos por lados) o polihexos (formados por hexágonos regulares idénticos unidos por lados) sobre campos triangulares o hexagonales regulares, respectivamente. Se podrían estudiar también juegos correspondientes a estos animales aunque sobre tableros menos regulares.

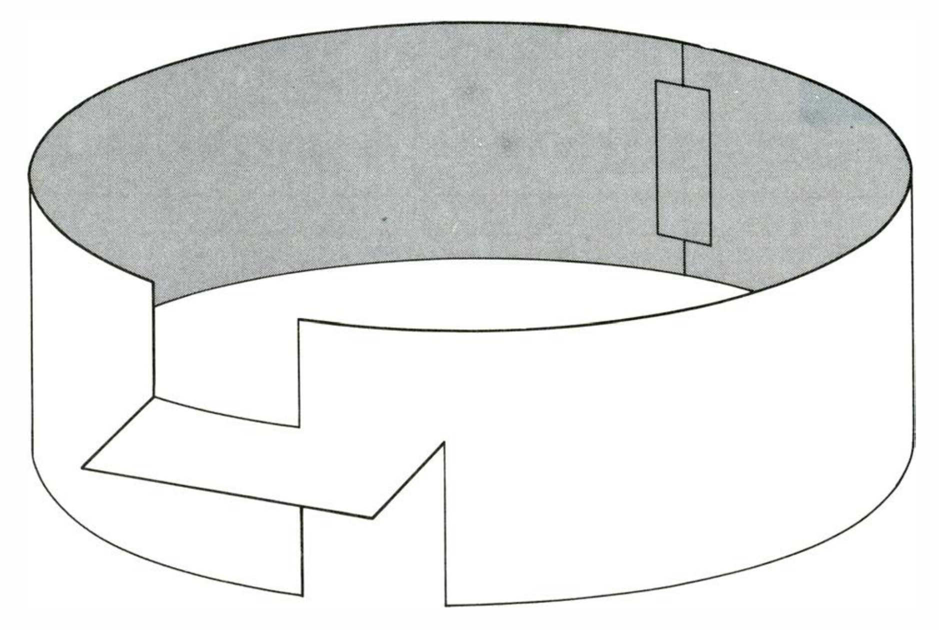
Evidentemente, los juegos correspondientes a animales formados por células cuadradas pueden generalizarse sin dificultad a tableros de dimensión tres, o mayor todavía. Por ejemplo, el homólogo tridimensional del poliominó es el policubo: n cubos unitarios conectados por caras. Dado un cierto policubo, podríamos buscar los números b y m basados en el mínimo retículo cúbico en el cual el primer jugador puede asegurarse la victoria, e igual que antes, intentar encontrar todos los policubos que sean perdedores fundamentales. Esta generalización apenas si ha sido explorada.

Como ya he mencionado, Blass, actualmente profesor asociado en Michigan, es uno de los principales colaboradores de Harary. Entre los otros se encuentran Exoo, Jerald A. Kabell y Heiko Harborth, quien está investigando los parientes triangulares y hexagonales de los animales cuadrados. Harary proyecta escribir un libro sobre juegos de consecución y de evitación donde se analizarán todas estas generalizaciones del tatetí y de otros juegos íntimamente relacionados con él; asímismo está preparando programas de ordenador para jugar partidas de ellos, tanto a la ofensiva como a la defensiva.

La hipercarta "imposible", comentada en la sección del mes de enero de *Investigación y Ciencia*, sugiere cierto número de variantes. Paul T. Merva y Alexis A. Gilliland, independientemente, atinaron con las más interesantes. Cada uno de ellos me envió un modelo del aro de papel que podemos ver en la figura de esta misma página. En realidad es una banda de Möbius, y en la forma en que ha sido representada tiene un aspecto todavía más misterioso que la carta primitiva. Gilliland aplicó también la construcción a la tapa de un bote cilíndrico y a una botella de Klein.

En el caso de la banda de Möbius pueden hacerse tantas solapas como se desee; la figura resultante es aparentemente un aro sin torsión. En realidad, el aro tendrá una sola o dos caras según que el número de solapas sea par o impar. Usando un aro de cartón de los empleados como servilleteros (o con un anillo cortado de un recipiente cilíndrico) es posible incluso hacer un número par de tales solapas sin tener que abrir el aro y volver a unir los extremos.

Muchísimos lectores me escribieron insistiendo en que el número de Seguridad Social pedido en el número del mes de febrero no era único, y presentando diversas otras "soluciones". Estuve intrigado durante un tiempo, hasta que descubrí lo sucedido: todos ellos habían utilizado una calculadora con visualización de ocho dígitos para dividir entre 8 un número de ocho cifras, sin comprobar a mano si había o no resto. (Incidentalmente, un número es divisible por 8 si y solamente si lo es el formado por sus tres últimas cifras.)



La solapa mágica de una banda de Möbius

Otros muchos lectores enviaron demostraciones correctas de la unicidad del número 381654729, fundadas bien en programas de ordenador, o bien en las conocidas reglas de divisibilidad y algunos razonamientos.

Michael R. Leuze utilizó un ordenador para buscar soluciones del problema en bases distintas de la base 10. Descubrió así que no existe solución si la base es impar, y que tampoco existen en base 12. En base 2 hay una solución trivial: 1. En base 4 hay dos soluciones, 123 y 321; en base 6 las soluciones son 14325 y 54321; en base 8 se tienen 3254167, 5234761 y 5674321. En base 14, lo mismo que en base 10, hay una única solución: 9 12 3 10 5 4 7 6 11 8 1 2 13. Leuze conjetura que ya no existe solución en bases mayores.

David M. Sanger generalizó el problema en un sentido diferente, preguntándose cuáles son los números cuyos primeros n dígitos forman un número divisible por n, sin más requisitos. Su programa de ordenador le permitió hallarlos todos, comenzando por los 45 números de dos cifras (despreciando los ceros iniciales), y terminando con el único número de 25 cifras 3.608.528.850.368.400.786.036.725.

Siendo imposible añadir un vigésimosexto dígito que dé un número divisible entre 26, el número anterior termina la sucesión. Hay 2492 números de 10 cifras. El más pequeño es 1.020.005.640, y el mayor de ellos, 9.876.545.640. Uno de los más curiosos es 3.000.060.000. El número de número buscados crece regularmente desde $n = 2$ hasta $n = 9$ o $n = 10$ (en ambos casos hay 2492 soluciones), y a partir de ahí decrece constantemente. Para los valores desde $n = 20$ hasta $n = 25$, el número de números es, respectivamente, 44, 18, 12, 6, 3 y 1. El último es el único número que proporciona una única solución para todo n.

Alan Delahoy fue el primero de los numerosos lectores que me envió demostraciones de que 16 movimientos bastan para permutar los caballos de ajedrez. Muchas de estas demostraciones comienzan transformando el problema en un grafo de 12 puntos, en la forma expuesta en mi libro *Aha! Insight* (W. H. Freeman and Co. 1977), en cuya primera impresión di erróneamente como número mínimo de movimientos 18. Planteado el problema de esta forma es fácil ver que una solución ha de constar de un número par de jugadas, y nunca menos de 14. (Si el tablero contuviera solamente tres caballos del mismo color harían falta 7 jugadas para trasladarlos de un lado a otro del tablero.) Lo único que ahora se necesita es probar que 14 movimientos son excesivamente pocos. El detalle que reduce los 18 pasos a 16 está en la observación de que marchando hacia atrás con un caballo –volviendo a ocupar una casilla por la que ya había pasado– se despeja el camino para otros saltos. Todas las soluciones en 16 jugadas tienen esta característica.

Howard Rumsey, Jr., probó con un computador doméstico que los caballos pueden alcanzar cualquier configuración que se desee, partiendo de la disposición inicial, en 22 jugadas o menos. Si la disposición inicial es también arbitraria, es posible alcanzar cualquier configuración final en no más de 26 movimientos. Rumsey encontró siete pares de tales disposiciones (sin contar simetrías) que exigen precisamente 26 pasos para ir de una a otra.

James G. Mauldon sugería sustituir el caballo central de cada bando por un rey que se moviera como un caballo y requerir entonces que los reyes intercambiaran sus posiciones. Descubrió para este problema una solución en 22 movimientos. Si en las casillas centrales se colocan sendos caballos de cada color (con lo que habrá cuatro por bando), la permutación de los cuatro puede ejecutarse en 12 movimientos. Mauldon exigió también la condición de que estos ocho caballos estuvieran apareados respecto a la línea central horizontal del tablero, y que todos los pares se intercambiaran. En su opinión, el número mínimo de jugadas es entonces de 36. Además ha encontrado una solución en 44 pasos que empareja además los caballos simétricamente situados respecto al centro del tablero.

El razonamiento del robot ASMOF para mostrar la imposibilidad de que una persona sea en un tercio escocesa, en un tercio china y en otro tercio húngara, recibió duras críticas. Los lectores tienen razón al no tomarse en serio la solución del robot, pues se apoyaba en varias hipótesis nada verosímiles. En concreto, el razonamiento de ASMOF decansa en la absoluta pureza de sangre de todos los progenitores, lo que en el mundo real resulta ridículo tan pronto como la genealogía de cualquiera se haga retroceder unas cuantas generaciones.

Una última corrección: Al final de la sección del mes de febrero se le atribuyó indebidamente una demostración sobre números primos a la señora Anna M. Penk. En realidad, se trata de la madre de Michael A. Penk, especialista en computación, y cuyo nombre debió aparecer en su lugar.

Taller y laboratorio

Más sobre los bumerangs: ¿Qué relación guardan éstos con las pelotas de golf?

Jearl Walker

Describíamos, el mes pasado, los mecanismos básicos por los que un bumerang retorna a la persona que lo lanza. Pero la explicación dejó sin aclarar algunos aspectos llamativos del diseño y del vuelo de dichos ingenios. Comenzaremos, en esta nueva ocasión, por aclarar tales aspectos, para luego detallar cómo experimentar con bumerangs construidos con las técnicas que desarrollamos en el último número de la revista.

Característica interesante de ciertos bumerangs antiguos es su superficie rugosa. Algunos de los modelos más antiguos encontrados en Australia gozan de esa particularidad, como si la persona que los construyó pensara que con la superficie rugosa llegarían más lejos. Aunque la idea no parece muy acertada, podría ser correcta. La reacción inmediata es pensar que tal rugosidad aumenta el rozamiento entre la superficie del bumerang y el aire que lo rodea en cada instante, con lo que el aparato perderá velocidad más rápidamente y, por tanto, caerá al suelo mucho antes. Si una superficie rugosa ha de privilegiarse, no lo será, por supuesto, desde el punto de vista del rozamiento. De alguna otra manera, deben estar implicadas otras cuestiones.

Muchos objetos que nos son familiares tienen también rugosa la superficie, al objeto de que dure más su tiempo de vuelo. La pelota de golf, con su superficie salpicada de hoyitos, constituye el ejemplo más conocido. En los primeros tiempos del golf, todas las pelotas eran lisas, como intuitivamente se sugería que debiera ser. Pero casualmente alguien cayó en la cuenta de que las bolas peladas y con marcas por el uso llegaban, al parecer, mucho más lejos que las lisas, aun siendo golpeadas de igual manera. A partir de entonces, se fabricaron las pelotas con hoyuelos. En una ocasión Ascher H. Shapiro hizo pruebas comparativas entre una bola lisa y una bola con hoyuelos; halló que esta última alcanzaba una distancia más de cuatro veces mayor que la lisa, a pesar de la diferencia de rozamiento con el aire.

¿Cómo cooperan con el vuelo los hoyuelos de la superficie de un objeto? La respuesta está en el comportamiento del aire que rodea a la bola de golf con hoyuelos o al bumerang de superficie rugosa en su movimiento. Con el fin de simplificar, consideremos primero el comportamiento del aire que rodea en su vuelo a una superficie de sustentación. La mayor parte del aire que pasa a su alrededor no se ve afectada por las fuerzas de viscosidad, que son las fuerzas de rozamiento que se crean entre dos capas de aire, o bien entre una capa de aire y la superficie del elemento volador. Sin embargo, próxima a la superficie hay una capa de aire, llamada capa límite, que viene afectada en gran manera por las fuerzas de viscosidad. El aire más cercano a la superficie no se mueve; se mantiene en su sitio debido a la fuerza de rozamiento entre éste y la superficie. La capa próxima de aire tiene una velocidad baja. Al ir considerando estas capas estrechas, cada vez más alejadas de la superficie, se va descubriendo que las mismas se mueven a una velocidad cada vez menos afectada por las fuerzas de rozamiento con la superficie del aparato. El espesor de la capa límite se define como la distancia existente entre la superficie y el nivel a partir del cual puede despreciarse la fuerza de rozamiento. La clave del comportamiento de la pelota de golf con hoyitos y del bumerang con superficie rugosa está en el movimiento del aire en la capa límite.

La presión del aire alrededor de una superficie de sustentacion clásica es alta delante y detrás del aparato, relativamente más baja encima del mismo y más alta por debajo. En el último número explicábamos que la diferencia de presión entre la parte de arriba y la de abajo obedecía al principio de Bernoulli. Esta diferencia de presión permite que el aparato se sustente. Este mes veremos cómo el aire se mueve desde delante hacia atrás del aparato por la parte superior del mismo.

Consideremos dos pequeños volúmenes de aire, uno situado dentro de la capa límite y otro justo fuera de ella. Cuando en su movimiento se aproximan a la superficie de sustentación, frenarán su movimiento hasta detenerse en razón de la alta presión existente en la zona justo delante del aparato. Al alcanzar la parte de arriba del aparato (y debido a que se está moviendo), dichos volúmenes son acelerados a medida que los empuja la diferencia de presión existente entre la región frontal y la superior. El volumen situado en la capa límite tiene que vencer la acción de las fuerzas originadas por la viscosidad, cuya acción se extiende hacia el exterior desde la superficie del aparato y, por ello, su movimiento se acelera menos. De ahí que, cuando los dos volúmenes pasan por encima del aparato, el situado fuera de la capa límite se mueve más de prisa.

Conforme los volúmenes se acercan a la parte posterior de la superficie de sustentación, se enfrentan con una presión creciente, que les va frenando. El volumen situado fuera de la capa límite llegará a pararse una vez que alcance la parte posterior de la superficie, comenzando a acelerarse un poco después del mismo debido a la alta presión que encontrará, y así conseguirá volver a tomar la velocidad que tenía antes de que empezara a pasar la superficie de sustentación. El volumen situado dentro de la capa límite que inicia su movimiento hacia la parte de atrás es más lento y, en consecuencia, puede llegar a detenerse antes de haber alcanzado la parte posterior. Si se llega a parar, la alta presión existente en la zona de atrás puede hacerlo incluso retroceder, lanzándolo hacia la parte superior de la superficie de sustentación; ello provoca que tenga que subir aire de la parte de abajo para reemplazarlo. Este flujo empujará hacia fuera de la superficie el aire de la capa límite. Tal efecto recibe el nombre de "separación" y tiene gran influencia en

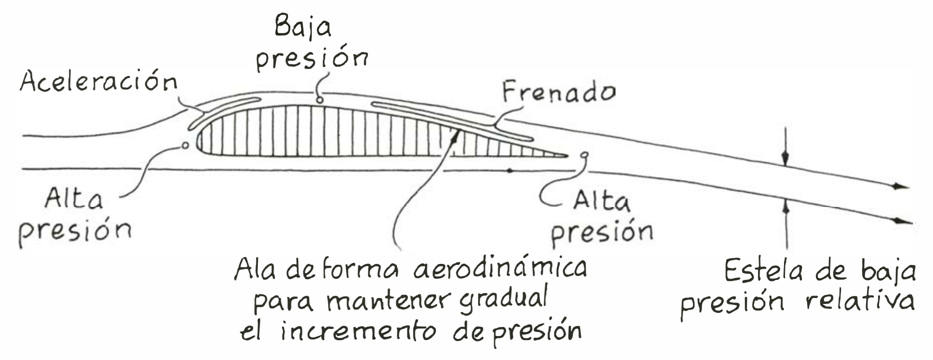
la resistencia al avance en superficies de sustentación.

Parte de esta resistencia al avance proviene del rozamiento existente entre el aire y la superficie de sustentación. Y podría denominársele resistencia debida al rozamiento superficial. Otro factor que influye en la oposición al avance es la diferencia entre la presión media existente delante y la que ocurre detrás de la superficie. Si las presiones medias son más o menos iguales, su contribución es pequeña; entonces, con tener en cuenta sólo la resistencia debida al rozamiento superficial es suficiente. Sin embargo, en algunos casos la diferencia de presión resulta tan elevada que su influencia es incluso mayor que la del rozamiento superficial. Una situación tal puede producirse cuando la capa límite se separe de la superficie, dejando una estela relativamente ancha de aire turbulento, en el lugar donde antes existía una alta presión. La presión de la turbulencia es intermedia entre la baja presión en la parte superior de la superficie de sustentación y la alta presión delantera. Así, la diferencia de presión entre la parte delantera y la trasera puede ser grande, dando lugar a la aparición de una fuerte resistencia al avance. Cuanto más adelante se produzca la separación en el paso del aire por encima de la superficie, tanto mayor será la resistencia debida a la diferencia de presión. Con una pronta separación, la presión en la estela es menor y, más ancha, la propia estela; ambos efectos reducen la presión media en la parte posterior del aparato.

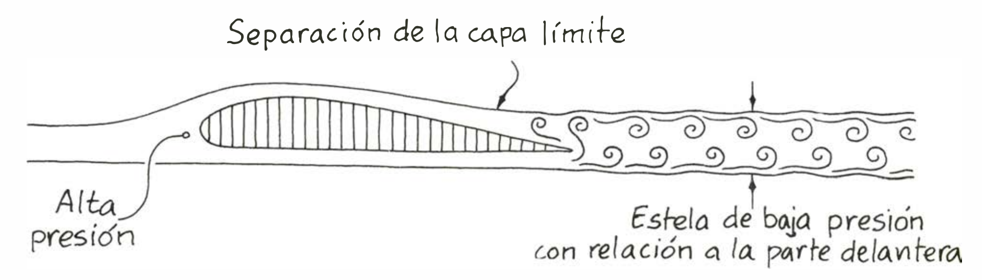
Una bola de golf lisa es un objeto uniforme en el cual la capa límite se separa rápidamente, tal vez antes de haber recorrido la mitad de la distancia hasta la parte posterior. Los hoyuelos de la pelota tienen por finalidad retrasar dicha separación (podría darse a la bola una forma aerodinámica para conseguir el mismo resultado, pero una pelota de golf en forma de ala de avión no rodaría bien por el césped). Al principio, el efecto de los hoyuelos parece contradecir la intuición, ya que lo lógico es que incrementen la resistencia al avance al aumentar el rozamiento superficial. Sin embargo, la reducción de la diferencia de presión es tan grande que, en conjunto, la resistencia al avance se hace menor y, como consecuencia, la pelota alcanza una distancia considerablemente mayor.

Los hoyuelos están diseñados de suerte que provoquen una turbulencia en la capa límite, la cual mezcla rápidamente el aire de dicha capa con el exterior. En virtud de ello, el aire de la capa límite no mengua su velocidad con respecto al exterior, pues continuamente está recibiendo impulso por parte de este último. Cuando el aire de la capa límite pasa por la parte superior de la bola en dirección hacia la región posterior, no se ve detenido en su movimiento hasta alcanzarla, ya que no basta la alta presión de esa zona para empujarlo hacia fuera de la superficie. De ello resulta que la estela es relativamente estrecha y la diferencia de presión entre la parte anterior de la bola y su parte posterior no es tan grande como lo sería en el caso de que tuviera lisa su superficie.

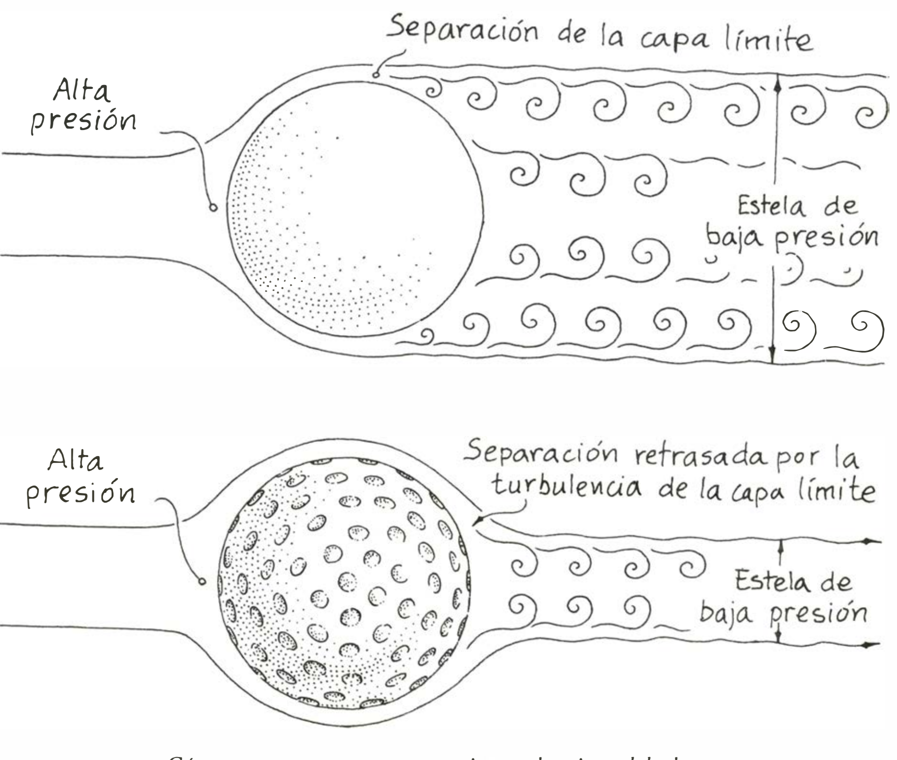
Durante los últimos años cierta casa comercial ha estado ofreciendo bolas con un nuevo diseño de los hoyuelos. Se ha cambiado la distribución regular de hoyuelos circulares por una distribución aleatoria de otros hexagonales. La base



Distribución de la presión del aire alrededor de una superficie de sustentación



Separación de la capa límite



Cómo se comporta una corriente de aire al ladear una pelota de golf lisa y una pelota con hoyuelos

de dicho diseño ha sido las investigaciones de John Nicolaides, de la Universidad de Notre Dame. Según los informes, la bola alcanza una distancia media de 6 metros más que la bola tradicional. No conozco la razón, pero quizá la causa sea la creación de una turbulencia más adecuada en la capa límite.

Recientemente he visto una demostración del efecto de la bola con hoyuelos en el Ontario Science Centre, en Toronto. Se unía una pelota lisa a una barra; ésta se hallaba sujeta, de forma articulada, por su parte superior a un soporte; la bola podía moverse así en caso de que una corriente de aire incidiera directamente sobre ella. Otra pelota, ésta con hoyuelos, se montaba de igual manera. Al provocar la corriente de aire, aquella pelota que ofreciera menos resistencia se desplazaría menos; por tanto, sería la bola cuya barra soporte se desviaba menos de la vertical. Cuando conectamos la corriente de aire, observamos que era la bola con hoyuelos la que tenía un desplazamiento más pequeño; era, pues, la que ofrecía una resistencia menor.

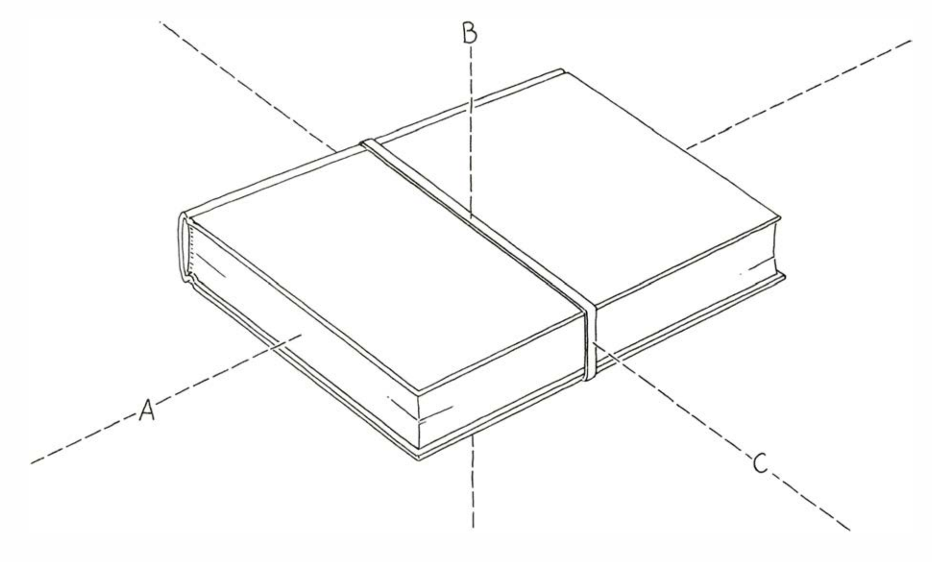
¿Habría que practicar hoyuelos –rugosidades– en la superficie de un bumerang? Tal vez. Deberíamos pensar en la probabilidad de que se produzca la separación en una superficie de sustentación moviéndose a una velocidad moderada, como ocurre en un bumerang. Cuando los investigadores estudian la corriente de un fluido sobre un objeto, deben poder comparar las diversas probabilidades de separación y turbulencia obtenidas empleando fluidos diferentes (con densidades y viscosidades distintas) y objetos asimismo diferentes (para comparar tamaños). Al acometer las comparaciones, se usa un número adimensional llamado número de Reynolds. Se llama así en honor de Osborne Reynolds, quien contribuyó grandemente al análisis de la dinámica de fluidos en el siglo XIX. El número se calcula a partir de la densidad y velocidad del fluido multiplicado por una dimensión típica del objeto y dividido por la viscosidad del fluido. Cuando el número de Reynolds es alto, pueden presentarse la separación y la turbulencia, la capa límite es turbulenta y en este caso se dice que el flujo es sólo ligeramente viscoso. Aunque el fluido tenga una alta viscosidad, puede ocurrir normalmente que bajo determinadas condiciones se tenga un número de Reynolds alto y que entonces la corriente de fluido se comporte como si no hubiera viscosidad. Una diferencia de presión dada impulsando a un volumen de fluido provocará una aceleración de dicho volumen, que dependerá de la densidad del fluido más que de la viscosidad.

Si el número de Reynolds es bajo, no ocurren ni la separación ni la turbulencia, la capa límite es laminar y el flujo se dice que es viscoso. De nuevo, su comportamiento no depende directamente del valor real de la viscosidad, que de hecho puede ser más bajo. Cuando el número de Reynolds es bajo, la diferencia de presión que impulsa la parcela de fluido queda contrarrestada en casi su totalidad por las fuerzas opuestas de la viscosidad, con lo que resulta una aceleración mínima.

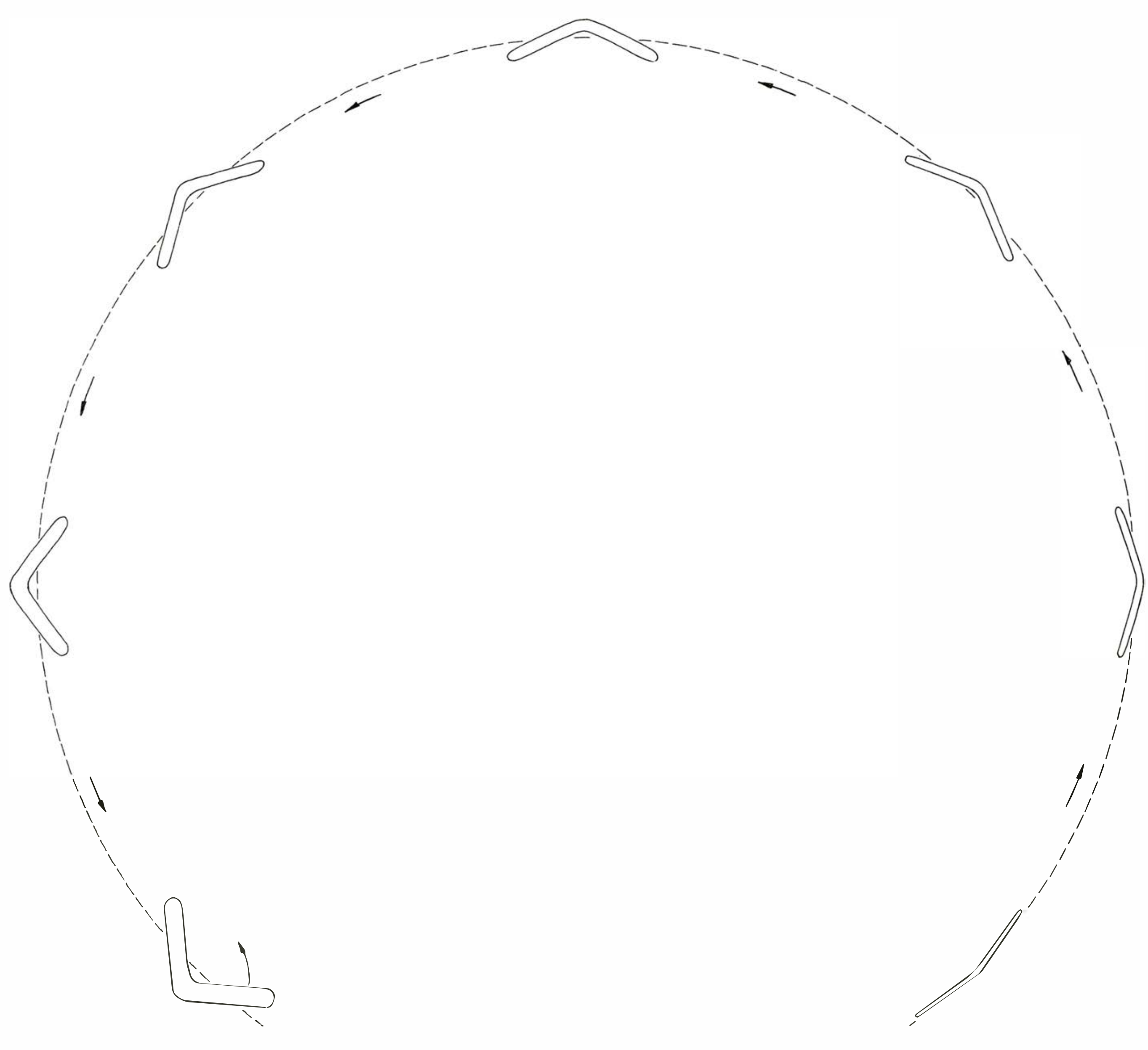
Para una pelota de golf, el número de Reynolds tiene un valor intermedio, lo suficientemente alto como para que se produzca muy probablemente la separación y la turbulencia en la estela, pero no lo bastante alto como para que la capa límite sea turbulenta. Está justificado practicar hoyuelos en la superficie (incluso a costa de aumentar el rozamiento superficial). ¿Qué pasa con el bumerang? Desgraciadamente, el número de Reynolds de un bumerang típico también se sitúa más o menos en el centro de la escala de valores, haciendo con ello que el efecto de la rugosidad superficial quede poco claro. Si el comportamiento de un bumerang concreto no está muy afectado por una rápida separación de la capa límite, hacer rugosa la superficie no es eficaz, puesto que la resistencia total al avance se vería incrementada por la resistencia adicional debida al rozamiento superficial. Por el contrario, si el comportamiento de un bumerang viniera condicionado de forma decisiva por una separación rápida, el hacer rugosa la superficie puede incrementar su tiempo de vuelo.

Una cuestión afín que puede reducir la probabilidad de que se produzca la separación radica en que el objeto tenga o no tenga forma aerodinámica. Las alas de los aeroplanos tienen forma aerodinámica para reducir la separación y la resistencia al avance causada por la diferencia de presión. ¿Deberían tener tambien forma aerodinámica los brazos de un bumerang? Para simplificar, consideremos de nuevo una superficie de sustentación ideal. Cuando el aire de la capa límite se mueve sobre la parte superior en dirección a la parte posterior, halla un progresivo incremento de la presión que retarda su avance hasta pararlo y origina una separación. Si el recorrido hasta la parte posterior es corto, el incremento de la presión es muy rápido y la separación puede resultar inevitable. De ahí que un objeto tal como un aeroplano tenga una parte posterior afilada con el fin de conseguir que el incremento de presión sea gradual. La forma afilada también incrementa la zona a través de la cual el aire pasa rozando contra la superficie. Con todo, al evitar la separación, se compensa el incremento de oposición al avance.

Saphiro da un ejemplo de formas aerodinámicas en su libro *Shape and Flow: The Fluid Dynamics of Drag*. En él compara la resistencia global al paso de una corriente de aire a 340 kilómetros por hora que presentan un alambre cilíndrico y una superficie de sustentación aerodinámica; llega a la conclusión de que el alambre ofrece a la corriente de aire la misma oposición que la superficie de sustentación, siendo ésta 10 veces más ancha. La intuición nos sugiere que la superficie mucho más gruesa de sustentación presentará una oposición mucho mayor, pero la intui-



Los tres ejes principales de rotación de un libro



Así se "tumba" un bumerang en vuelo

ción no siempre tiene en cuenta la sutileza de la separación de la capa límite y la oposición por la diferencia de presión. Cuando el número de Reynolds es alto, conviene dar forma aerodinámica al objeto.

Supongamos que el fluido pasa alrededor del objeto de manera que el número de Reynolds sea lo suficientemente bajo como para que no ocurra la separación. El dar forma aerodinámica al objeto (en virtud del incremento del rozamiento superficial) podría resultar perjudicial. Por contra, el objeto tiene que ser redondeado, presentando al aire la menor superficie posible.

¿Deben tener forma aerodinámica los brazos de un bumerang? Probablemente sí, pero no he encontrado ninguna razón definitiva en que basar mi suposición. Una vez más, el número de Reynolds para un bumerang normal está en la incómoda zona del centro, por lo que no tenemos claro si basta la separación para justificar el incremento del rozamiento superficial que traería consigo el que un bumerang tuviera los brazos con forma aerodinámica.

Podemos preguntarnos por qué ningún bumerang tiene forma de un palo recto. Ni siquiera un palo recto, convenientemente redondeado por un lado y afilado por el otro para que adquiera forma aerodinámica, serviría como bumerang. La razón es sutil, pues hay que tener en cuenta la estabilidad de un objeto en rotación sometido a las pequeñas perturbaciones que sufre en su camino.

Supongamos que atamos un libro con una banda elástica resistente de suerte que permanezca siempre cerrado, y que lo lanzamos al aire. Tal como muestra la ilustración de la página opuesta, el libro puede girar alrededor de tres ejes principales. La rotación alrededor de dos de ellos (el *A* o el *B*) es estable, pero alrededor del tercer eje (el *C*) se balanceará al girar.

Los ejes se caracterizan por el modo en que se distribuye la masa del libro con respecto a ellos. Cuando el libro gira alrededor del eje *A*, su masa está distribuida de la forma más próxima posible al eje. El momento de inercia del libro con respecto a dicho eje es mínimo. Por el contrario, el momento de inercia respecto al eje *B* es máximo, debido a que la masa del libro se halla distribuida de la forma más alejada posible con

respecto al eje. Para el eje *C*, el momento de inercia tiene un valor intermedio; por eso, la rotación del libro alrededor de este eje es inestable.

La estabilidad depende de lo que haga el momento angular del libro cuando éste se desvíe ligeramente de la dirección paralela al eje principal respecto al cual el libro está girando. (El momento angular del libro es un vector que tiene por magnitud la velocidad angular multiplicada por el momento de inercia, y por dirección la perpendicular al plano sobre el cual el libro está girando.) Para dos de los ejes principales (*A* y *B*), cualquier desviación del vector momento angular es corregida rápidamente volviendo a su posición inicial paralela al eje principal. Mientras que, para el eje *C*, cualquier desvío del vector de su posición paralela al eje de giro hace que aumente más todavía el desvío. Si se consigue que el libro gire alrededor del eje inestable con su vector momento angular exactamente paralelo al eje *C*, el libro rotará de forma estable. Pero cualquier desvío de dicha condición de paralelismo (cosa probable que suceda) se incrementará rápidamente durante el vuelo y hará que el libro cabecee. Si el momento angular máximo y el intermedio son casi iguales, como sucedería si el libro fuese cuadrado, los giros alrededor de cualquiera de los ejes con ellos asociados serán inestables.

El bumerang típico en forma de banana gira alrededor del eje sobre el cual el momento de inercia es máximo y, por ello, su giro y su vuelo son estables. Sin embargo, con un bumerang recto, el momento de inercia máximo y el intermedio serían casi iguales, por cuya razón el bumerang resultaría inestable. El balanceo impediría que el bumerang chocase con el aire con el ángulo de ataque adecuado; en consecuencia, el aparato no se sustentaría. En resumen, un bumerang recto no es un bumerang.

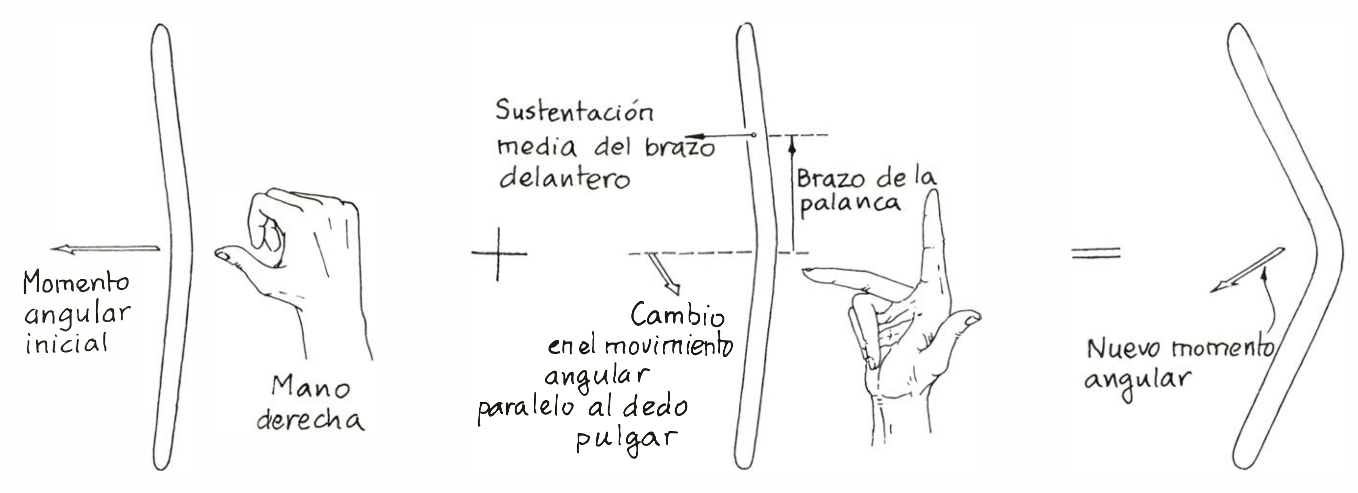
Una característica curiosa de un bumerang regular es su tendencia a "tumbarse", es decir, a que su plano de giro pase, de ser casi vertical, a ser horizontal. Al comienzo del vuelo, la velocidad del bumerang es suficientemente grande, de manera que el plano de giro sólo necesita estar ligeramente desviado de la vertical para proporcionar la fuerza de sustentación necesaria y contrarrestar el peso del bumerang. A medida que el roce del aire va frenando la velocidad, la fuerza de sustentación debe tener una componente vertical progresivamente mayor para mantener elevado el bumerang. Cuando éste regresa al lanzador, el plano de giro es casi horizontal.

Se pueden identificar dos posibles causas de esta variación del plano de rotación. Una, que es cierta para todos los tipos de bumerang, concierne al aire deflectado por el brazo que gira hacia adelante del centro de masa del bumerang. Siempre que un brazo gira hacia adelante, deflecta la corriente de aire que pasa, la cual fluye (ligeramente después) alrededor del otro brazo a medida que el bumerang avanza. Así pues, el brazo posterior se encuentra con aire ya perturbado y no sufre la misma elevación que el brazo anterior.

Así, un bumerang que acaba de ser lanzado por una persona con su mano derecha registra una fuerza de sustentación horizontal hacia la izquierda del lanzador. Cuando el aire abandona el brazo delantero, es deflectado hacia la derecha del lanzador. (Según las leyes de Newton sobre el movimiento, cada acción tiene una reacción igual y opuesta. Si el bumerang es lanzado hacia la izquierda por el aire, éste debe ser lanzado hacia la derecha en la misma proporción.) Cuando el brazo posterior gira en el aire, que a su vez está moviéndose hacia la derecha, registra una elevación algo menor que el brazo delantero porque el aire no impulsa al bumerang con el ángulo de ataque óptimo. (El ángulo de ataque puede, incluso, ser negativo.) Resulta, pues, que a medida que un bumerang gira, el brazo delantero experimenta siempre una sustentación algo superior a la del posterior.

La diferencia de fuerzas tiende a desequilibrar el plano de giro, de forma que la parte trasera del bumerang oscila hacia la derecha (visto por el lanzador) y la delantera hacia la izquierda. Como indicamos el mes pasado, esta leve inclinación no se debe a que el bumerang esté girando y tenga momento angular. Sucede, en realidad, que el par resultante de las fuerzas hace que el plano de giro precese, es decir, gire sobre un eje horizontal hasta que el ángulo de giro se vuelve horizontal al final del vuelo.

Para entender esta tendencia a situarse en un plano horizontal, imaginemos una vista aérea de un bumerang recién lanzado por la mano derecha con el plano de giro vertical y, por tanto, con su vector momento angular hacia la izquierda del lanzador. En promedio, la sustentación por delante del centro de masa es mayor que detrás de dicho centro, debido al aire deflectado con el que se encuentra la región posterior del bumerang. Para simplificar las cosas, consideremos que la elevación posterior es nula (el resultado de este razonamiento es el mismo aun cuando se dé a esta elevación su valor real). El cambio del momento angular obedece al par causado por la fuerza de sustentación media en la sección delantera. Para situar la dirección del cambio hay que emplear la regla dada el mes pasado: coloque el dedo índice de la mano derecha señalando desde el centro del



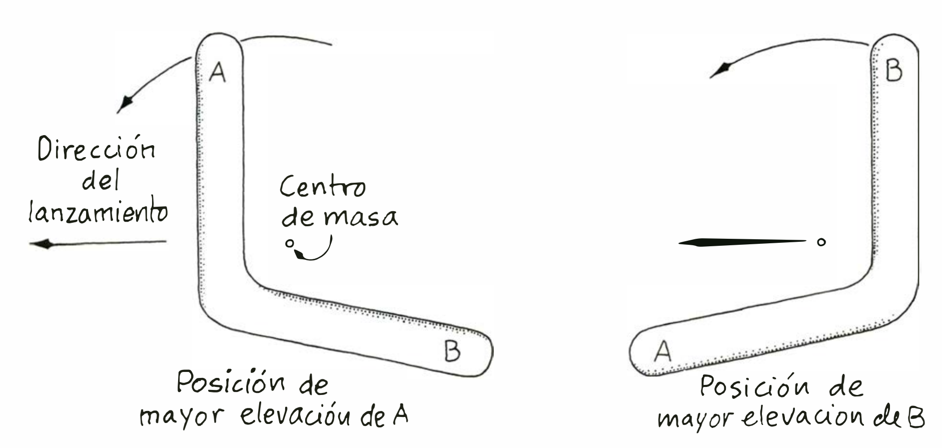
Cambio del momento angular a medida que desciende un bumerang

bumerang hacia el lugar donde se aplica la fuerza de sustentación en el brazo del bumerang, sitúe el dedo corazón paralelo a la sustentación y estire el pulgar perpendicularmente a ambos dedos. El pulgar señalará la dirección del cambio en el momento angular, que será ascendente, perpendicular al momento angular existente.

Dado que el momento angular inicial está dirigido hacia la izquierda y el cambio es ascendente, el vector momento angular gira para ser más ascendente, haciendo que el plano de giro del bumerang gire también, y pase de vertical a horizontal. El bumerang ha empezado a descender. Esta rotación, llamada precesión porque se trata de una rotación del vector momento angular, continúa durante el vuelo. Cuando el bumerang regresa al lanzador, el plano de giro es casi horizontal y la fuerza de sustentación del bumerang está casi totalmente dirigida hacia arriba.

La segunda causa posible de que al final el plano de rotación sea horizontal es similar. Quizás un brazo tenga una forma que origine una fuerza de sustentación mayor que el otro (en la ilustración de esta misma página, el brazo con mayor sustentación se indica por *A* y al otro por *B*). Ambos brazos originan la máxima sustentación cuando se mueven hacia arriba (como mencioné el mes pasado), porque la velocidad del aire que pasa por el brazo es mayor cuando el brazo está girando en el aire que viene a su encuentro. Cuando *A* se halla en su posición óptima, coincide con el centro de masa. Cuando *B* está en su posición óptima, se encuentra detrás del centro de masa. Si la máxima sustentación ejercida en *A* es siempre mayor que la ejercida en *B*, como se determinará por la forma de sección transversal de los brazos, la sustentación será en general mayor delante del centro de masa que detrás del mismo. Una vez más, la diferencia entre la fuerza delante del centro de masa y la fuerza detrás de él crea un par que hace que el plano de rotación se incline. Lo mismo que sucedía con el aire deflectado, el par hace girar el vector momento angular del bumerang, inicialmente horizontal, hasta una posición vertical, lo que induce al bumerang a tumbarse.

Si el bumerang no se tumbase, su vuelo resultaría más corto y menos interesante, porque en algún punto del vuelo la velocidad anterior sería demasiado baja para producir la suficiente fuerza ascendente que sostuviera al bumerang. Si éste desciende tan rápidamente que ya esté horizontal a mitad del vuelo, puede seguir precesando, cambiando su vector momento angular y, por tanto, inclinando su plano de giro por debajo del horizontal. El bumerang empezará entonces a curvarse en la dirección opuesta, y puede describir incluso una figura en forma de ocho antes de regresar a la persona que lo lanzó.



Posiciones de elevación máxima en los brazos de un bumerang en vuelo

No es más fácil construir un bumerang que vuele recto que otro que regrese. Hay que reducir, hasta casi su desaparición, la componente horizontal de la fuerza de sustentación, pero deberemos asignar a su componente vertical un valor tal que mantenga elevado el aparato a pesar de su peso. La sustentación horizontal se elimina torciendo los brazos para dar un ángulo negativo de ataque cerca de los extremos de los brazos y un ángulo positivo de ataque cerca del centro. La sustentación total se reduce, aunque no llega a anularse. Se lanza el bumerang con su plano de giro casi horizontal, de manera que la sustentación neta sea casi vertical.

Si lo arrojamos con un plano de giro a unos 20 grados por encima del horizontal, una pequeña fuerza de sustentación horizontal hace que el bumerang vuele en línea recta hacia la izquierda de la persona que lo lanzó. Un leve descenso determina que el plano de giro rote hasta ser horizontal, y entonces lo hace descender por debajo del plano horizontal. Luego, el ingenio cambia de dirección, inclinándose hacia la derecha del lanzador. Porque el recorrido no es perfectamente recto, el lanzador tiene que conocer bien su objeto de diversión, sobre todo si intenta alcanzar un blanco distante.

Durante muchos años se han venido dando explicaciones al vuelo y regreso de los bumerangs, pero muchas de ellas han sido erróneas y carentes de verificación experimental. Aunque la mecánica básica del vuelo de los bumerangs se conocía ya desde 1837, excepto en los aspectos relativos a la moderna teoría de la superficie de sustentación, parece ser que la información fue ignorada o mal entendida por autores posteriores. En 1897, G. T. Walker adelantó una explicación teórica clásica en su artículo "On Boomerangs" aparecido en las *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.

El tratamiento moderno más exhaustivo del tema de los bumerangs lo constituye la tesis doctoral de Felix Hess, incluida en la bibliografía. Hess repasa la vieja información y examina, teórica y experimentalmente, el comportamiento de los bumerangs. Su libro recoge algunas interesantes ilustraciones tridimensionales de vuelos simulados por ordenador que el lector puede examinar a través de un visor de estereoscopio que se encuentra al final de la obra.

Se están llevando a cabo investigaciones sobre bumerangs en túneles de viento, en donde los investigadores estudian los recorridos de las corrientes de aire en torno a un bumerang fijo. Pero aún quedan muchas cosas que pueden realizar los aficionados manejando sus propios aparatos construidos cuidadosamente. Si el lector se propone este objetivo, el primer problema será resolver qué hace el bumerang durante el vuelo, porque el lanzador estará sólo en un extremo del vuelo y le será difícil apreciar con exactitud la distancia y la altura. Para determinar la distancia habría que colocar a varios observadores a lo largo del recorrido. Para ver la altura, habría que medir el ángulo que forma el recorrido en el campo de visión. Conociendo la distancia y el ángulo podremos calcular la altura alcanzada por el bumerang.

Algunos investigadores han incorporado una luz al bumerang y lo han lanzado en la obscuridad, mientras mantenían abierto el objetivo de una cámara

fotográfica. El resultado es un trazado luminoso en la fotografía, que señala el recorrido del ingenio.

Hess publicó un artículo en el número de noviembre de 1968 de *Scientific American*, que aducía ejemplos de esta técnica. Pero con una cámara común resulta difícil apreciar la naturaleza tridimensional del trazado. E incluso disponiendo dos cámaras que fotografiasen el recorrido desde distintas perspectivas, no resultaría nada fácil combinar ambas informaciones para obtener la trayectoria tridimensional. Se pueden obtener mejores resultados si se fotografía el bumerang iluminado con la técnica estereoscópica descrita en esta sección en febrero pasado. Cuando se ponen las dos fotografías resultantes en un estereoscopio, se ve una imagen combinada con profundidad.

Hess y otros investigadores han iluminado los bumerangs incorporándoles un pequeño circuito de pilas, un oscilador eléctrico y una pequeña luz. La idea es buena, pero hay que encajar los objetos en la madera (como hizo Hess), porque de lo contrario éstos afectan a la corriente de aire en torno al bumerang. Las pilas y el oscilador van sujetos al centro del aparato y la lucecita se coloca en un brazo, de forma que el momento de inercia del bumerang se altere lo menos posible. También es válido el recurso a las bengalas para mostrar el recorrido del vuelo.

Existen muchas variables de investigación posibles si el lector quiere experimentar con los bumerangs. Aunque Hess ha hecho un trabajo muy bueno al simular vuelos de bumerangs con sus programas de ordenador, no ha dado directrices referentes a cuál sea el proyecto mejor, ni cómo mejorar el malo a base de pequeños cambios de construcción. Las principales variables son las referentes al lanzamiento y a la construcción. Un bumerang comprado puede servir para estudiar las variables de lanzamiento, pero será necesario que el lector se talle el suyo para examinar las variables de construcción.

Para investigar sobre el lanzamiento hay que buscar un espacio amplio y abierto, con poco viento. Se elegirá luego una variable y se mantendrán las otras constantes en cuanto sea factible. Sé que mantener las constantes de lanzamiento fijas resulta difícil, porque nunca se podrán repetir dos golpes sucesivos de la misma manera. Si se fotografía el lanzamiento con un tomavistas, se podrá comparar de forma objetiva el ángulo de lanzamiento, el giro y la velocidad en los distintos ensayos. ¿Hasta qué punto dependen, de la dirección del lanzamiento, la duración del vuelo, la distancia total recorrida, la altura máxima alcanzada (normalmente se lanza hacia el horizonte), el ángulo entre el plano de giro y la vertical (cuanto mayor sea el ángulo más empinado será el ascenso), la velocidad de rotación y la velocidad hacia adelante?

En los bumerangs caseros, ¿hasta qué punto depende el vuelo de la forma de la sección transversal de los brazos, de la curvatura y del peso? A mí me intriga, sobre todo, si vale la pena dar forma aerodinámica a los brazos. ¿Habría que afilar las puntas de los brazos? ¿o convendría que estuvieran redondeadas? ¿Debe ser el bumerang estrecho en el centro y más ancho en los extremos de los brazos? ¿Cambia el vuelo si el borde frontal está afilado en lugar de ser romo?

Puesto que no se conoce el efecto de la rugosidad de la superficie, quizás al lector le interese resolver la cuestión. En lugar de hacer agujeros o muescas en un bumerang de madera, se podría intentar fijar cinta de celofán que sea adhesiva por ambos lados. La propia cinta puede crear una capa límite turbulenta o podríamos provocar una turbulencia salpicando arena en el adhesivo. Algunos investigadores han tratado de averiguar el efecto de la turbulencia colocando un cable fino justo delante del borde de ataque de cada brazo. Los resultados de Hess a este respecto no fueron definitivos.

Algunos entusiastas de los bumerangs de retorno han descubierto que, añadiendo lastre a los brazos, cerca de los extremos, se puede incrementar en mucho la distancia del vuelo de ida. En 1972, Herb A. Smith, cuyo diseño "Gem" para un bumerang describí el mes pasado, lanzó uno de este tipo hasta una distancia de casi 100 metros. Según el *Guinness Book of World Records*, éste es el vuelo más largo que se ha registrado. Smith sugiere que debe añadirse lastre hasta un total de un tercio del peso del bumerang y que se debe hundir éste (normalmente serán trozos de plomo) en agujeros hechos a una distancia de unos 2,5 centímetros de los extremos de los brazos. Si se añade peso en el centro, éste mantendría quizás al aparato en un vuelo más estable; pero se puede conseguir llegar a mayor distancia si se coloca el lastre cerca de los extremos, porque así se incrementa el momento de inercia. El aficionado podrá comprobar por sí mismo el efecto del lastre en su bumerang casero y, por si le interesaran los records mundiales, podría intentar mejorar el lanzamiento de Smith.

Libros

Dos clásicos, uno de anatomía veterinaria y otro de ecología de poblaciones, y sobre el color y la dieta

J. Sandoval, R. Margalef, C. Gómez-Reino y P. Castillo

ANATOMIA TOPOGRAFICA Y APLICADA DE LOS ANIMALES DOMESTICOS, por R. Berg. Editorial A. C.: primera edición española, 1978; 415 págs., 200 figs. (algunas en color). Traducción del original alemán: Dr. M. E. Salamanca. Las corrientes aplicativas de la anatomía veterinaria han cobrado un gran auge en los años recientes, a propósito de las reuniones y congresos de las sociedades mundial y europea de anatomistas veterinarios, donde ha prevalecido la necesidad de proyectar los conocimientos anatómicos hacia fines eminentemente prácticos en consonancia con la realidad de los sistemas educativos. Hace dos años, la anatomía aplicada quedó incorporada como entidad disciplinaria al curriculum de veterinaria en España. Los antecedentes de la anatomía aplicada veterinaria son, así pues, relativamente recientes, lo que justifica la escasez real de tratados publicados hasta la fecha.

Después de las obras de Taylor (1955) y Getty (1966) –no muy bien sistematizadas e incompletas– y las de Habel (1973) y Sandoval y col. (1978) que representan más bien manuales orientativos de ejercicios prácticos que se programan para alumnos de la disciplina, la de Berg que reseñamos es, sin duda, la más asequible y completa, puesto que recopila y actualiza un gran número de trabajos y aportaciones de la especialidad diseminados por la literatura, difícilmente asequibles para el profesional y para el estudiante. De ahí la ambivalencia de la obra que satisface a la vez como tratado de consulta en el proceder médico-quirúrgico veterinario y para el alumno que cursa la disciplina; a ello podríamos añadir la utilidad de su sistemática ordenada en cuanto a la posibilidad de ser adoptada total o parcialmente por los docentes encargados de impartir este tipo de enseñanzas.

En este último sentido debe significarse el criterio regional y topográfico –tal como entendemos ha de tratarse el estudio de la anatomía aplicada– que prevalece en la obra, a cuyo fin se divide en ocho grandes capítulos correspondientes a otras tantas partes corporales (cabeza, cuello, tórax, abdomen, dorso, pelvis, miembro torácico y miembro pelviano). Aunque los sujetos fundamentales de estudio son el caballo, vacuno y perro, también en el gato, cerdo y pequeños rumiantes se establecen las referencias oportunas de interés en regiones concretas revestidas de especial importancia aplicativa. Además, al final de estos grandes apartados, se hace un breve estudio de la anatomía aplicada de las aves (gallina). Otro hecho, en fin, a destacar se refiere a la terminología anatómica adoptada, que no es otra que la establecida en la Nómina Anatómica Veterinaria (NAV), edición de 1968.

En cuanto a la sistemática o método general de estudio de cada parte corporal, en una primera fase establece referencias fundamentales de superficie, cuales son la división regional pertinente, los puntos óseos visibles y palpables, los surcos musculares y las áreas cutáneas de inervación. A renglón seguido considera cada región en particular, significando su naturaleza topográfica (estratigrafía) y cuantas connotaciones anatómicas de interés médico (exploración) o quirúrgico (intervención) haya que puntualizar; un tratamiento especial reciben los órganos viscerales de las cavidades torácica, abdominal y pelviana, todo ello en base a la revisión de 138 citas que se recogen en la bibliografía. Un total de 200 fotografías ilustran la obra; algunas de estas últimas se reproducen en color, preferentemente aquellas que ofrecen regiones de encrucijada vascular y nerviosa. Hemos podido notar a este respecto que ciertas ilustraciones que pretenden topografiar o proyectar desde la superficie corporal una estructura profunda –por ejemplo, algunas sinoviales articulares– no están correctamente puntualizadas por no considerar debidamente las referencias esqueléticas.

Nos hallamos, así pues, ante una obra diseñada como una forma de anatomía aplicada exclusivamente al proceder médico-quirúrgico, puesto que no aborda otras parcelas (paraclínica y postclínica) en que también incide de modo directo la anatomía fundamental y cuyos conocimientos serían muy oportunos, sobre todo para alumnos de nuestras Facultades de Veterinaria que derivan en el segundo ciclo del curriculum hacia otras ramas de especialización diferentes de la de medicina y sanidad. Incluso dentro de esta última se nota la falta en la obra que referenciamos de los anexos correspondientes a anatomía radiológica, muy a pesar de la justificación que el propio autor hace al respecto en la introducción. De otro lado, los cuadros sinópticos que se intercalan en el texto sólo merecen un valor de síntesis y no un evidente interés aplicativo o didáctico. Unicamente desde este último punto de vista, en fin, creemos que la obra se hubiera visto enriquecida con una relación, al final de cada capítulo, de "objetivos fundamentales a puntualizar", de un modo análogo a los que inserta Habel en la suya *Applied Veterinary Anatomy* (1973).

De todos modos la obra cubre una importante laguna de la especialidad en lengua castellana, y así lo hicimos constar a Editorial A. C. cuando en su día recabó de nosotros asesoramiento sobre la conveniencia de su traducción y publicación. A esta editorial corresponde el mérito de una fiel transcripción, cuyos caracteres tipográficos y encuadernación son un fiel reflejo de la obra original. Pensamos que la utilización de papel cuché en las páginas donde se insertan figuras en color no hubiera encarecido mucho la tirada en favor de una impresión más perfecta de estas últimas. Prescindiendo del reiterado abuso de los latinismos para designar las estructuras anatómicas –las normas de la NAV autorizan la versión literal de la terminología latina al idioma que corresponda–, la traducción nos ha parecido correcta en todo momento. En resumen: dentro de las limitaciones apuntadas, nos hallamos ante un buen tratado que abrirá, sin duda, camino hacia los horizontes de una concepción realista y utilitaria de la anatomía veterinaria. (J. S. J.)

AN INTRODUCTION TO POPULATION ECOLOGY, por G. E. Hutchinson. Yale University Press, New Haven and London, 260 págs. La producción científica del Prof. Hutchinson ha tenido siempre una extraordinaria calidad inspiradora y ha contribuido perceptiblemente a la configuración del pensamiento ecológico de estas últimas décadas. Sus ensayos de tipo más literario, que, de vez en cuando, rozan el preciosismo, siempre ricos en erudición, resultan atractivos para un espectro amplio de lectores y, para el biólogo, tienen la virtud de hacer ver la historia de la ciencia con matices inaprehendidos en los

manuales al uso. Este libro se basa en cursos ofrecidos a los estudiantes de Yale y combina de manera elegante y fácil de seguir las mejores cualidades de la prosa del autor. A pesar de su sencillez, el libro es profundo y coloca ágilmente en su sitio con comentario acertado todas las contribuciones recientes al tema. La parte anecdótica e histórica va en notas al pie de las páginas que, en algunos capítulos, tienen una extensión igual o mayor que el texto donde desarrolla el tema principal. Podríamos decir que el libro se dirige a las "dos culturas", la letra normal a los científicos y la letra pequeña a "los otros". Hay pocos libros científicos y menos anglosajones que, como éste, contengan alguna referencia a la García Lorca y a la "querencia".

El primer capítulo, titulado "M. Verhulst" (40 págs.) se ocupa de demografía humana en general y, particularmente, de los problemas asociados al nombre de Malthus y a los límites de la población. El segundo capítulo se titula "Formas interesantes de pensar en la muerte" (45 págs.) y trata de la curva de la supervivencia, estudiada de las poblaciones humanas a las poblaciones fósiles, con la debida consideración al significado e integración de las curvas de supervivencia en los sistemas ecológicos. El capítulo tercero lleva por título "¿Por qué tienen tantos niños?" (27 págs.) y se ocupa de la regulación del número de descendientes y estrategias ecológicas en relación con las diversas formas de protección de que goza la prole y con el territorialismo. "La vida en común en la teoría y en la práctica" (35 págs.) encabeza el capítulo cuarto, que trata fundamentalmente de las cuestiones relacionadas con la competencia, dando la consideración debida a las plantas, demasiado olvidadas en libros comparables. El título del capítulo quinto es "Qué es un nicho" (51 págs.), tema favorito del autor, que lo desarrolla de manera primorosa y estimulante. El último capítulo habla de "Cómo se ha compuesto la naturaleza viviente" (20 págs.) y habla de la estructuración de las comunidades naturales, cuyo principal trama se basa en las cadenas alimentarias y encuentra una expresión en la diversidad. El texto incluye dos apéndices. El primero, "Aria da capo and Quodlibet", defiende la necesidad de una aproximación intelectual amplia a los problemas de la biología, sin temor a las críticas de una lógica seca y, a fin de cuentas, yerma. Unas páginas encabezadas "Raciocinator infantium" ofrecen los rudimentos de la Matemática suficientes para seguir, si hacen falta, el texto del libro.

Las figuras son claras y dibujadas de manera uniforme; como en todos los libros de Hutchinson son insoslayables algunas reproducciones deliciosas de grabados y caricaturas antiguos. El libro lleva buenos índices, pero las citas bibliográficas extensas al pie de las páginas obligan a algunas repeticiones, inconveniente que se compensa cuando aquellas llevan algún comentario justo y sabroso. (R. M.)

EL COLOR Y SU MEDICION, por R. D. Lozano. Editorial Américalee S. R. L. Buenos Aires, 640 págs., 1978. Este libro puede considerarse como la publicación de una amplia monografía que trata de los procesos involucrados en el fenómeno del color. En ella no sólo se abordan los fundamentos teóricos y los métodos experimentales de la colorimetría sino también sus aplicaciones industriales estando, como reconoce su autor en el prólogo, dedicada fundamentalmente a los profesionales y técnicos relacionados de una u otra forma con el color. El contenido del libro armoniza con la sencillez de exposición que se manifiesta a lo largo de él, los conocimientos del científico con las necesidades prácticas del técnico, y tiene la inusual virtud de estar redactado en castellano, lo que le da otro nuevo aliciente para ser recomendada su lectura a todos aquellos hispanoparlantes interesados en el tema del color.

El libro se inicia, en su capítulo I, con una breve introducción en la que el autor da cuenta de la evolución de las distintas teorías acerca del color desde la más remota antigüedad hasta nuestros días, así como de los sistemas colorimétricos no normalizados internacionalmente. El capítulo II, sobre el ojo y los mecanismos de la visión, puede considerarse como una introducción a la óptica fisiológica. Sin embargo, se lleva a cabo un estudio detallado de la retina pues la comprensión y el conocimiento de los mecanismos de la visión en sus aspectos físico, químico, psicológico y fisiológico son fundamentales para el entendimiento de la visión del color.

El extenso capítulo III, bajo el título "Aspecto físico del color", trata de las magnitudes radiométricas, de los radiadores térmicos y no térmicos y de los detectores selectivos y no selectivos, haciendo énfasis en las características de ambos. Asimismo se estudia el efecto de la radiación electromagnética sobre los cuerpos materiales mediante la capacidad que tienen para reflejar, transmitir, dispersar o absorber la radiación que incide sobre ellos. Al final de este capítulo existe una muy sucinta nota sobre fotometría.

La correspondencia entre el fenómeno físico y el psicológico es tratada en el capítulo IV. En él se presentan y discuten los métodos psicológicos que permiten evaluar el color, atribuyéndole una magnitud que lo caracterice y lo haga corresponder con una forma matemática de especificación. El capítulo V se dedica a la medida práctica del color, basada en el principio de aditividad formulado por Grassmann, y se pone de manifiesto que la sensación de un color puede descomponerse en sensación luminosa, luminosidad, y sensación cromática, cromaticidad, gracias a las cuales se puede especificar un color. Los dos capítulos anteriores tratan, pues, el aspecto psicológico del color.

En el capítulo VI, R. D. Lozano aborda la necesidad de establecer un sistema de medición de diferencias de colores, lo que se lleva a cabo mediante la determinación de los umbrales diferenciales. Este es uno de los principales problemas de la aplicación técnica del color, pues quizá sea más importante desde el punto de vista industrial del color evaluar la uniformidad de la producción de un color que conocer su verdadera magnitud. En este capítulo se detallan los métodos experimentales para la evaluación de las diferencias cromáticas así como las fórmulas matemáticas, ya sean empíricas o aproximadas mediante transformaciones lineales o no lineales, que nos expresan estas diferencias en los diversos sistemas.

El siguiente capítulo trata del error cometido en la medición del color y de su complejo origen debido a la múltiple naturaleza del mismo. Existen errores en la medición de la magnitud física y en la evaluación sensorial del estímulo, además de los propios errores instrumentales. En la primera parte del capítulo se aborda el análisis teórico del problema a través de la variancia y covariancia de las curvas patrones; la segunda trata del análisis práctico, donde se estudian los distintos errores que afectan a la medición real.

El capítulo VIII, que es el más extenso de la obra, está dedicado a la colorimetría industrial. Comienza con una enumeración de las aplicaciones del color en la industria. En particular se analizan los aspectos comunes de las distintas industrias para pasar más tarde a estudiar las aplicaciones específicas de cada una de ellas. Concluye con un análisis de los instrumentos comerciales más recomendables para cada uso aportando datos que pudieran ser útiles para los usuarios como características técnicas, fabricantes, costos, ventajas o desventajas técnicas, etc. El capítulo IX trata de la reproducción del color. En él no se hace un detallado análisis de la técnica de repro-

ducciones de color; tan sólo se da una idea de cómo se realiza ésta en la industria gráfica, fotografía y televisión.

En el décimo y último capítulo se examinan los aspectos de la visión del color no tenidos en cuenta en la medición colorimétrica. En primer lugar se abordan las discriminaciones visuales que dependen de la longitud de onda; más tarde se alude a la visión real de los observadores. A continuación se estudian las anomalías en la visión del color y se concluye con las teorías más importantes que explican la visión del color.

Termina la obra con tres apéndices y una extensa relación de artículos que se complementan con una lista de los libros más importantes existentes sobre el tema. Tal vez merezca indicarse que en la bibliografía figura un trabajo de M. Aguilar sobre óptica fisiológica. Este nombre con el de L. Plaza y el del Instituto de Optica de Madrid constituyen la representación de los científicos y centros de investigación españoles en el libro. En resumen, ha de considerarse esta obra como un buen libro de consulta para todo aquel que se interese en el fenómeno del color. (C. G.-R.)

ELEMENTOS DE NUTRICION, por Augusto Corominas y Juan Manuel de Garandias. Editorial Universitaria de Barcelona, 1979. Se trata de un libro de texto en el que se recogen una serie de nociones generales sobre distintos aspectos de la nutrición. Aceptable en su conjunto, requiere una profundización posterior y aplicación práctica de algunos de sus conceptos, dadas las limitaciones lógicas de una obra "elemental" (Prólogo). Desde el punto de vista pedagógico, se advierte cierta confusión en las ideas, así como la desubicación de los cuadros y tablas dentro del contexto que no les corresponde; lo cual puede dar origen a algunas ambigüedades, dificultando al mismo tiempo su estudio. Detallaré este aspecto general de la crítica, prestando especial atención a los puntos más directamente dietético-nutricionales, dejando a un lado los históricos y sociológicos, que, desde luego, son necesarios para situar en un contexto humano la importancia de la nutrición.

En primer lugar, los conceptos. Se dan por conocidas algunas nomenclaturas y siglas que un neófito en la materia no tiene por qué saber. Tal es el caso del concepto mismo de nutrición como praxis y como función fisiológica, y nutrición como ciencia que estudia los alimentos y su relación con la salud. Respecto a las siglas, recojo algunas al azar (MAO, INSERN, TCM, etc.) que no se explican y cuyo significado se considera sobreentendido. Se advierte cierta superficialidad. Valga, a modo de ejemplo, el tema de los carbohidratos (pág. 37), afrontado muy someramente. Faltan datos tan importantes como: tipos, fuentes, productos terminales, etcétera. Lo mismo diríamos del agua (pág. 49), ya que no señala puntos tan relevantes como funciones en el organismo, ingreso, eliminación, equilibrio hídrico, absorción, fuentes y recomendaciones. En el tema dedicado a las sustancias indeseables contenidas en los alimentos (pág. 49) convendría resaltar más los aspectos de toxicidad inducida por sustancias extrañas en el alimento (riego, fumigación, etc.), y la que es debida a sustancias que entran en la composición misma de los alimentos.

Por lo que hace referencia a los cuadros y tablas, en general se advierte la falta de relación entre ellos y el texto, así como la ambigüedad y falta de explicación de algunos. Por ejemplo, al exponer los glúcidos en la pág. 37, se remite al lector a la tabla XI, y se observa cómo dicha tabla no concuerda con la explicación del texto de referencia. Más concretamente, el esquema del metabolismo proteico, de la pág. 17, expone una serie de paramentos super y yuxtapuestos, sin indicar las relaciones y correlaciones que pueden darse entre los distintos conceptos enmarcados en cada paramento. En la tabla XIV, según el texto que a ella nos remite, deberíamos encontrar sólo las necesidades de calcio. Y efectivamente así es; pero el título de la tabla podría inducir al error de que en ella se encuentran otros minerales. Lo mismo hay que decir de la tabla XV (pág. 43), con el mismo título que la tabla anterior, cuando su contenido se refiere a requerimientos de hierro en diferentes circunstancias. La tabla XVII carece de título; además, cuando se la cita en el texto de la pág. 49, se remite al lector a la tabla XVIII. Hay errores en la tabla XX y en la XXV (en ésta se podía haber hecho resaltar las grandes diferencias cualitativas de los dos tipos de leche –de ternera y humana– no sólo en cuanto a proteínas sino también en los diferentes tipos de ácidos y las ventajas que tiene la leche materna, ante cualquier fórmula artificial, respecto a tolerancias, digestibilidad y aporte de anticuerpos para el lactante). La tabla XXVI resulta bastante incompleta, ya que no incluye alimentos habituales en el consumo diario: col, acelgas, espinacas. Convendría destacar, de algún modo, el distinto valor nutritivo que contienen los alimentos según las diferentes formas de su consumo y preparación. Por ejemplo, el valor nutritivo de las patatas varía según se consuman con piel o sin ella, y según se preparen fritas, asadas o cocidas.

El apéndice, que lleva por título "Tipos de alimentación (código alimentario)", enumera simplemente las distintas clases de alimentos, por grupos alimentarios, sin una finalidad técnica aparente. Es una simple lista de alimentos, sin explicación alguna.

Y llegamos al punto de las dietas. Comencemos por la de 500 calorías. Se supone que son hipocalóricas, pero no se da explicación alguna al respecto. Por otra parte, para que una dieta sea válida hay que calcularla en razón del individuo para quien se prescribe.

El valor nutritivo difiere generalmente bastante de unas dietas a otras. Pongo por ejemplo la diferencia marcada entre la dieta 1 y la 6, la 10, la 18, etc., en las que apreciamos diferencias excesivas entre los distintos requerimientos de nutrientes. Se observan, entre los nutrientes, diferencias de 10 y más gramos entre unas dietas y otras, cantidad diferencial que es a todas luces excesiva. Se ha de hacer el mayor intercambio de alimentos posible, pero la cantidad de nutrientes ha de ser siempre la misma. ¿Carne de cordero en dietas hipocalóricas? La encontramos en varias.

No se explica qué clase de dietas son las de 2500 calorías. ¿Normales? ¿Hiperproteicas? ¿Otra clase? No se indica para qué tipo de personas, siendo que una dieta debe variar según la salud, el sexo, la edad, la actividad, etcétera, de las personas. Siempre que se elaboran dietas hay que tener en cuenta el nivel económico de los individuos a los que son suministradas, ya que no todos pueden conseguir fácilmente todos los alimentos aconsejables o utilizables. Esto en el caso de pacientes de consulta externa. En el caso de instituciones, deben ser utilizadas de acuerdo al presupuesto que se tenga previsto para alimentación. Algunas de ellas, muy sofisticadas, al incluir alimentos como el venado, las frambuesas, el brándamo, algunos pescados, que, además de ser costosos, no se encuentran fácilmente en el mercado. Las bebidas alcohólicas no son suministradas a nivel clínico, salvo escasas excepciones.

En este segundo grupo de dietas se advierte una deficiente distribución de alimentos. Unas están recargadas de alimentos pertenecientes al mismo tipo, como el de las carnes y quesos, mientras que en otras se omiten alimentos como las verduras y la leche. En algunos desayunos se observan lagunas como la ausencia de algunas bebidas calientes y de carbohidratos (dietas 15 y 17). Se trata, además, de dietas no equilibradas, ya que en varios casos no se tienen en cuenta los requerimientos de los nutrientes (60 por ciento de hidratos de carbono, 15 por ciento de proteínas, 25 por ciento de grasa como lo indica el dibujo de la portada). En el caso de que se trata de dietas normales, según parece, en algunas la cantidad de proteínas es muy alta, mientras que la cantidad de carbohidratos es baja, o en otros la cantidad de grasa es muy alta. En una dieta no basta con cuadrar las kilocalorías, sino que hay que equilibrarlas de acuerdo con el porcentaje de proteínas, grasas y carbohidratos.

En relación con las dietas en general, la tabla XXII enumera muchos tipos. Convendría señalar algún ejemplo de las más importantes usadas en clínica, como son la blanda, hiposódica en general, hipograsa, hipocolesterolémica, para diabetes, láctea.

En el apartado dedicado a los alimentos prohibidos para régimen hiposódico (pág. 173) no se indica si son para hipertensos, cardíacos, insuficiencias renales, etc... Habría que citar los alimentos permitidos y las cantidades, en razón de la cantidad de sodio que el paciente necesite. Dentro del régimen hipocalórico (pág. 177) se prohíben todas las frutas sin distinción, "salvo excepciones especificadas" (subtítulo), cuando en realidad solamente algunas son las prohibidas, como el plátano, las uvas, las manzanas y otras que se caracterizan por contener más cantidad de carbohidratos.

Hasta aquí han prevalecido las consideraciones de carácter negativo, que podrían dar la impresión de una crítica destructiva, aunque esté muy lejos de ser esa mi intención. Sin embargo, y completando la afirmación inicial de "aceptable en su conjunto", diría incluso que logrado en sus objetivos, si lo consideramos, con sus autores, "un libro elemental" que pretende hacer tomar conciencia a los estudiantes de medicina y profesiones afines, de la problemática de la nutrición como praxis y de su importancia como ciencia.

Como libro de texto para estudiantes de medicina, farmacia y enfermería, la obra cumple su cometido, contando, por supuesto, con la debida explicación y profundización, que subsane las lagunas inevitables en una obra que no agota, ni lo pretende, el complejo campo de la nutrición. Los cuadros y tablas, así como las fórmulas, y, hechas las salvedades anteriormente detalladas, completan la obra, dotándola de un marcado cariz técnico. Cabe destacar por su contenido, importancia y claridad, los referentes a vitaminas (tabla XIII, pág. 38-39) y minerales (tabla XVI, págs. 44 y ss), así como la XXVI (págs. 64 y ss) sobre la descripción de los distintos alimentos y su composición. (P. C.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes;

ARMAS QUE UTILIZAN HACES DE PARTICULAS

THE PHYSICS OF FULLY IONIZED GASES. Lyman Spitzer, Jr. Interscience Publishers, 1956.

CLASSICAL ELECTRODYNAMICS. Págs. 309-390 y 429-463. John David Jackson. John Wiley & Sons, 1962.

ANTI-BALLISTIC-MISSILE SYSTEMS. Richard L. Garwin y Hans A. Bethe en *Scientific American*, vol. 218, nº 3, págs. 21-31; marzo, 1968

UN ENZIMA DE LA GLANDULA PINEAL QUE CONTROLA EL TIEMPO

PINEAL GLAND BIORHYTHMS: *N*-ACETYLTRANSFERASE IN CHICKENS AND RATS. Sue Binkley en *Proceedings of the Federation of Societies for Experimental Biology*, vol. 35. nº 12. págs. 2347-2352; octubre, 1976.

THE PINEAL. R. J. Reiter. Eden Press. 1977.

THE PINEAL GLAND: A. BIOLOGICAL CLOCK IN VITRO. Sue A. Binkley, J. B. Riebman y K. B. Reilly en *Science*, vol. 202, nº 4373, págs. 1198-1201: 15 de diciembre de 1978.

EVOLUCION DE LAS GALAXIAS DE DISCO

SPIRAL STRUCTURE, DUST CLOUDS, AND STAR FORMATION. Frank H. Shu en *American Scientist*, vol. 61. págs. 524-536: 1973.

GALAXIES AND THE UNIVERSE, VOL. 9: STARS AND STELLAR SYSTEMS. Dirigido por Allan Sandage, Mary Sandage y Jerome Kristian. The University of Chicago Press, 1975.

THE FORMATION OF GALAXIES. Richard B. Larson en *Galaxies: Sixth Advanced Course of the Swiss Society of Astronomy and Astrophysics*, dirigido por L. Martinet y M. Mayor. Geneva Observatory, 1976.

CLUSTERS OF GALAXIES. Neta A. Bahcall en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 15. págs. 505-540; 1977.

THE ORIGIN OF GALAXIES. Richard B. Larson en *American Scientist*, vol. 65, págs. 188-196; 1977.

THEORIES OF SPIRAL STRUCTURE. Alar Toomre en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. vol. 15, págs. 437-478; 1977.

LA ARCILLA

DIE SILICATISCHEN TONMINERALE. Karl Jasmund. Verlag Chemie, Gmbtt., 1955.

APPLIED CLAY MINERALOGY. Ralph E. Grim. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962.

MINÉRALOGIE DES ARGILES. Simonne Cailère y Stéphane Hénin. Masson et Cie., 1963.

GÉOLOGIE DES ARGILES. Georges Millot. Masson et Cie., 1964.

TERATOMAS Y QUIMERAS

COMPARATIVE DEVELOPMENT OF NORMAL AND PARTHENOGENETIC MOUSE EMBRYOS, EARLY TESTICULAR AND OVARIAN TERATOMAS, AND EMBRYOID BODIES. Leroy C. Stevens en *Teratomas and Differentiation*, dirigido por Michael I. Sherman y Davor Solter. Academic Press, Inc., 1975.

TOTIPOTENCY AND NORMAL DIFFERENTIATION OF SINGLE TERATOCARCINOMA CELLS CLONED BY INJECTION INTO BLASTOCYSTS. Karl Illmensee y Beatrice Mintz en *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 73, nº 2. págs 549-553; febrero, 1976.

TERATOCARCINOMA CELLS AND NORMAL MOUSE EMBRYOGENESIS. Christopher F. Graham en *Concepts in Mammalian Embryogenesis*, dirigido por Michael I. Sherman. The MIT Press, 1977.

CHIMERIC MICE DERIVED FROM HUMAN-MOUSE HYBRID CELLS. Karl Illmensee, Peter C. Hoppe y Carlo C. Croce en *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 75, nº 4, págs. 1914-1918; abril, 1978.

GENETIC MOSAICS AND CHIMERAS IN MAMMALS. Dirigido por Liane B. Russell. Plenum Press, en prensa.

LA OSTEOMANCIA CHINA

THE BIRTH OF CHINA. Herrlee Glessner Creel. Frederick Ungar Publishing Co., 1937.

BONE CULTURE OF ANCIENT CHINA. William Charles White. The University of Toronto Press, 1945.

FIFTY YEARS OF STUDIES IN ORACLE BONE INSCRIPTIONS. Tso-pin Tung. Center for East Asian Cultural Studies. 1964.

COMPUTER MATCHING OF ORACLE BONE FRAGMENTS. Hung-hsiang Chou con la colaboración de David G. Opstad en *Archaeology*, vol. 26, nº 3, págs. 176-181; julio, 1973.

SOURCES OF SHANG HISTORY. David N. Keightley. University of California Press, 1978.

FISICA DEL KARATE

ASIAN FIGHTING ARTS. D. F. Draeger y R. W. Smith. Kodansha International, Ltd., 1969.

PHYSICS WITH ILLUSTRATIVE EXAMPLES FROM MEDICINE AND BIOLOGY, VOL. 1: MECHANICS. George B. Benedek y Felix M. H. Villars. Addison-Wesley Publishing Company, 1974.

KARATE STRIKES. Jearl D. Walker en *American Journal of Physics*, vol. 43, nº 10, págs. 845-849; octubre, 1975.

EVOLUCION DE LOS TRANSPLANTES DE CORNEA

CIRUGÍA DEL SEGMENTO ANTERIOR DEL OJO. VOL. II (CIRUGÍA DE LA CÓRNEA). Joaquín Barraquer y Joaquín Rutllán, Inst. Barraquer, 1969.

TALLER Y LABORATORIO

SHAPE AND FLOW: THE FLUID DYNAMICS OF DRAG. Ascher H. Shapiro. Anchor Books, Doubleday & Company, Inc., 1961.

MANY HAPPY RETURNS. Peter Musgrove en *New Scientist*, vol. 61, nº 882, págs. 186-189; 24 de enero de 1974.

BOOMERANGS, AERODYNAMICS, AND MOTION. Felix Hess. Conferencia del autor en 1975 (c/o. Dr. H. Rollema, Eikenlaan 51, Peize, Netherlands).

PROJECT BOOMERANG. Allen L. King en *American Journal of Physics*, vol. 43, nº 9, págs. 770-773; septiembre, 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

POLYOMINOES. Solomon W. Golomb. Charles Scribner's Sons, 1965.

GRAPH THEORY. Frank Harary. Addison-Wesley Publishing Company, 1969.

EXTREMAL ANIMALS. Frank Harary y Heiko Harborth en *Journal of Combinatorics, Information & System Sciences*, vol. 1, n.º 1, págs. 1-8; 1976.